



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**MODERNÍ TRENDY NAVRHOVÁNÍ NOSNÝCH  
KONSTRUKCÍ STROJŮ**

MODERN TRENDS IN THE DESIGN OF FRAME MACHINE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Štěpán Holík**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Lukáš Zeizinger, Ph.D.**

**BRNO 2021**



## Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: Štěpán Holík  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení  
Vedoucí práce: Ing. Lukáš Zeizinger  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Moderní trendy navrhování nosných konstrukcí strojů

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracujte rešerši popisující využití moderních metod navrhování nosných konstrukcí strojů. Důkladně popište aktuální trendy a metodiky využívané pro efektivní návrh.

#### Cíle bakalářské práce:

Rešerše moderních metod pro návrh nosných konstrukcí.

Rešerše softwarových řešení.

Dimenzování strojních součástí při využití daných metod.

#### Seznam doporučené literatury:

ROTHWELL, Alan, Graham M. L GLADWELL, J. R BARBER a Anders KLARBRING. Optimization Methods in Structural Design. 242. Cham: Springer International Publishing, 2017. ISBN 9783319551968.

ZHANG, Weihong, Jihong ZHU a Tong GAO. Topology optimization in engineering structure design. Londýn: ISTE Press Ltd. ; Oxford, UK : Elsevier, 2016. ISBN 978-1-78548-224-3.

MAREŠ, Tomáš. Základy konstrukční optimalizace: Svazek II. Praha: Tomáš Mareš, 2006. ISBN 80-239-6508-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou využití moderních metod při navrhování strojních konstrukcí, zejména topologickou optimalizací. V první části je popsána historie konstruování, metody navrhování z hlediska přístupu k problému a také proces vývoje výrobku. Druhá část rozebírá jednotlivé metody používané při návrhu. Jsou zde porovnány metody topologické optimalizace a podrobně popsány softwarová řešení, která topologickou optimalizaci umožňují. Čtvrtá část se zabývá dimenzováním součástí za pomoci topologické optimalizace s demonstrací důležitých detailů na konkrétním příkladu v prostředí Ansys Mechanical a MSC Apex Generative Design.

## KLÍČOVÁ SLOVA

moderní metody návrhu, konstruování, metodologie, mřížkové struktury, optimalizace tvaru, proces vývoje výrobku, strukturální optimalizace, topologická optimalizace

## ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with the issue of using modern methods of machine structures design, especially topological optimization. The first part describes the history of design, design methods in terms of approach to the technical problem and product development process. The second part discusses the various methods used in the design. The methods of topological optimization are compared and software solutions that enable topological optimization are described in detail. The fourth part deals with the dimensioning of components using topological optimization with a demonstration of important details on a specific example in Ansys Mechanical and MSC Apex Generative Design.

## KEYWORDS

lattice structure design, mechanical design, methodology, modern design methods, product development process, shape optimization, structural optimization, topology optimization

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOLÍK, Štěpán. *Moderní trendy navrhování nosných konstrukcí strojů*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132121>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 60 s. Vedoucí práce Lukáš Zeizinger.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Lukáše Zeizingera, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2021

.....

Štěpán Holík

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Lukáši Zeizingerovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení a také všem, kteří mě v průběhu mého studia podporovali.



# OBSAH

<b>Úvod .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Cíl práce.....</b>	<b>4</b>
<b>2 Současný stav poznání řešené problematiky .....</b>	<b>5</b>
2.1 Konstruování strojů.....	5
2.1.1 Konstruktor .....	5
Důležité vlastnosti konstruktéra .....	5
2.1.2 Stroj .....	6
2.2 Vývoj konstruování a techniky .....	7
2.2.1 Starověk .....	7
2.2.2 Středověk .....	7
2.2.3 Průmyslová revoluce .....	8
2.2.4 20. století .....	8
2.3 Přístupy k návrhu .....	9
2.3.1 Metoda pokus-omyl .....	10
2.3.2 Metody intuitivní .....	10
2.3.3 Procedurální konstruování .....	10
2.3.4 Vědecké konstruování .....	11
2.3.5 Porovnání metod a jejich využití .....	11
2.4 Popis vývoje výrobku .....	12
<b>3 Moderní metody návrhu v konstruování.....</b>	<b>16</b>
3.1 Optimalizace tvaru .....	17
3.2 Rozměrová optimalizace.....	19
3.3 Topografická optimalizace .....	22
3.4 Topologická optimalizace .....	24
3.4.1 Proces topologické optimalizace .....	25
3.4.2 Metody topologické optimalizace .....	27
3.5 Multidisciplinární optimalizace .....	29
3.6 Mřížkové struktury .....	31
3.7 Softwarové řešení pro topologickou optimalizaci .....	33
3.7.1 Altair Inspire.....	33
3.7.2 Ansys Mechanical .....	34
3.7.3 Simulia – TOSCA Structure .....	36
3.7.4 MSC Nastran .....	38
3.7.5 MSC Apex Generative Design .....	39
<b>4 Dimenzování součástí pomocí topologické optimalizace.....</b>	<b>41</b>
4.1 Topologická optimalizace konzole poličky .....	41
4.1.1 Nastavení v Ansys Mechanical .....	42
4.1.2 Nastavení v MSC Apex Generative Design .....	46
4.2 Vyhodnocení výsledků Topologické optimalizace .....	49
4.2.1 Vyhodnocení výsledků v Ansys Mechanical .....	49
4.2.2 Vyhodnocení výsledků v MSC Apex Generative Design .....	51
4.2.3 Výsledky a diskuse .....	53

<b>Závěr .....</b>	<b>54</b>
<b>Použité informační zdroje .....</b>	<b>55</b>
<b>Seznam použitých zkratek a symbolů .....</b>	<b>59</b>

## ÚVOD

Konstrukční inženýři se odjakživa snaží o efektivní návrh strojních konstrukcí. Metodami efektivního návrhu se konstruování zabývá již od 19. století, avšak využitím moderních technologií se tyto metody v posledních desetiletích posunuly značně kupředu. Významnou roli při navrhování dnes zastávají počítačové výpočetní systémy. Do popředí se dostávají optimalizační moduly těchto nástrojů a se zrychlujícím se vývojem aditivních technologií zejména topologická optimalizace.

Následující kapitoly bakalářské práce poskytnou čtenáři ucelený přehled o těchto metodách. Také popíší a zhodnotí aktuálně dostupná softwarová řešení. Podrobněji se bude práce zabývat procesem topologické optimalizace, přístupy k ní a jejím nastavením. Cílem poslední kapitoly pak bude nahlédnout do problematiky dimenzování součástí právě s využitím topologické optimalizace a porovnat uživatelské rozdíly programů Ansys Mechanical a MSC Apex Generative Design.

# 1 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem práce je vytvořit rešeršní rozbor metod používaných při navrhování nosných konstrukcí a rozebrat jejich využití při dimenzování součástí. Dále popsat tyto metody a vytvořit přehled softwarových řešení, které s nimi pracují. Navíc také popsat moderní trendy a metodiky využívané pro efektivní návrh.

První část práce obsahuje rešerši dané problematiky. Je zde stručně popsáno, jak se vyvíjelo konstruování, technika a metodologie navrhování v průběhu historie. Následuje srovnání metod pro efektivní návrh z hlediska přístupu k problému. Poslední část této kapitoly vysvětluje jednotlivé části vývoje výrobku a porovnává klasický proces vývoje s vývojem výrobku, kde je využito moderních metod návrhu, konkrétně topologické optimalizace.

V druhé kapitole jsou rozebrány metody strukturální optimalizace, jakožto moderní metody efektivního návrhu. Největší důraz je kladen na topologickou optimalizaci, zejména kvůli její stále větší popularitě a dostupnosti. V závěru této části práce jsou popsána a zhodnocena některá softwarová řešení využívající právě topologickou optimalizaci.

Z této rešerše vychází poslední kapitola, kde jsou dále srovnány programy Ansys Mechanical a MSC Apex Generative Design. Na příkladu optimalizace konzoly poličky jsou popsány možnosti nastavení topologické optimalizace, její průběh a uživatelské porovnání obou softwarů.

## 2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

### 2.1 KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ

Konstruování součásti stroje, zařízení, znamená určení jeho tvaru a rozměrů. Navržený výrobek musí být funkční, spolehlivý, konkurenceschopný, použitelný, výrobitelný a prodejný. Výsledkem by mělo být řešení problému podložené formou technické dokumentace, dle které by se měl dát technický objekt vyrobit.

#### HLAVNÍ VLASTNOSTI NAVRHOVANÉHO STROJE:

- Funkčnost
- Bezpečnost
- Spolehlivost
- Pohotovost
- Bezporuchovost
- Životnost
- Konkurenceschopnost
- Vyrobitelnost
- Prodejnost

#### 2.1.1 KONSTRUKTÉR

Konstruktor řešením zadaného úkolu určuje jak technologii, tak i kvalitu hotového výrobku. Zároveň je zodpovědný za snižování nákladů na vývoj a následnou výrobu. Optimálních nákladů lze nejlépe docílit dodržením dobře organizovaného konstrukčního procesu a technologičnosti konstrukčního řešení. Proto je důležité, aby konstruktor začínal svou práci přesným vymezením způsobu, jak rozpoznat přijatelné alternativy a jak za dvou přijatelných alternativ vybrat tu lepší. Na tomto základě pak může vytvářet nebo volit strategie případné optimalizace. Znalostmi a možnostmi konstruktéra nebo konstrukčního týmu je omezena celá metodologie řešení. Navrhování je inovační a vysoce iterační proces. Je to ale také rozhodovací proces. Často musí být rozhodováno na základě minimálního množství informací nebo s množstvím částečně si odporujících informací. Rozhodnutí má někdy pouze prozatímní charakter, je ponecháno místo pro pozdější úpravu, kdy bude k dispozici více znalostí. [1]

#### DŮLEŽITÉ VLASTNOSTI KONSTRUKTÉRA

- Představivost
- Prostorové vnímání
- Přehled o stávajících trendech v konstruování
- Přehled o konkurenčních výrobcích na trhu
- Tvořivé myšlení
- Přehled o normalizovaných dílech používaných v navrhované konstrukci

- Přehled o aktuálním stavu výpočtových metod, mechaniky a pružnosti pevnosti
- Vyznat se ve strojírenských materiálech
- Znat technologie výroby

### 2.1.2 STROJ

„Hmotný objektový technický produkt na bázi mechanismů, který ulehčuje a nahrazuje fyzickou, příp. zčásti i duševní práci člověka.“ Obecně vzato „Technický produkt,“ je výstupem (technického) procesu. Má výrazný inženýrský obsah a ve strojírenství má obvykle dominantní hmotnou objektovou složku (označovanou souhrnně jako HW), obecně však ještě zahrnuje zpracované materiály (označované též jako náplně apod.), informace (označované souhrnně jako SW) a služby (označované též jako servis). [2]

Stroje jsou řazeny mezi technické produkty s dominantní hmotnou objektovou složkou. Ty se člení na technické objekty (stroje, nástroje, přístroje, technická zařízení apod.) a jeho části i v rozpracovaném stavu a technická zařízení (továrna, elektrárna, dopravní síť), což jsou nepřemístitelné technické objekty a jejich části. Systémovým spojením strojů nebo jiných technických produktů vzniká technický systém. [3]

### STUPNĚ KOMPLEXNOSTI TS A STROJNÍCH ČÁSTÍ:

Technické produkty lze rozřadit do čtyř stupňů komplexnosti, tak jak lze vidět v tab. 1.

Tab. 1 Stupně komplexnosti TS s vymezením oblasti strojních částí TS [3]

Stupeň komplexnosti TS	Technický systém (TS)	Charakteristika TS	Příklady TS	Oblast strojních částí TS
I.	Díl, součást	Element (stavební struktury) TS bez montážních operací	Čep, ložiskové pouzdro, pružina, podložka	Ano
II.	Stavební skupina, mechanismus, podskupina	Jednoduchý TS, který se skládá z dílů a může vykonávat jednoduché dílčí funkce	Převodovka, hydraulický válec, vřeteník	
III.	Stroj, přístroj, aparát	TS, který se skládá ze skupin a dílů a vykonává určité finalizující funkce	Soustruh, automobil, elektromotor	Ne
IV.	Strojní zařízení, strojní komplex	Komplexní TS složený ze strojů, skupin dílů s rozdílnými úkoly, které však mají funkční a prostorovou jednotu	Kalící linka, obráběcí linka, elektrická rozvodná síť	

## 2.2 VÝVOJ KONSTRUOVÁNÍ A TECHNIKY

Pod pojmem konstruování je těžké si představit konkrétní definici této činnosti, jelikož zahrnuje široké spektrum oblastí. Vše, co člověk vytvořil můžeme brát jako určitou formu konstruování. Vzniklo tehdy, když člověk začal při své práci přemýšlet a uplatnil tak myšlení při zhotovování prvních, dokonalejších nástrojů. Od té doby začalo mít vliv na rozvoj člověka a jeho vývoj se s časem zrychluje. [4]

Prvním technickým materiálem bylo dřevo a kámen, daleko důležitějším se však stalo zpracování kovů. Asi kolem roku 8 000 před našim letopočtem (dále jen př. n. l.) se poprvé setkáváme s kovolijectvím a kovotepectvím mědi. S tím je spojený i objev bronzu (slitina mědi a cínu) uskutečněný kolem roku 3 000 př. n. l. v Mezopotámii a Egyptě. [5]

### 2.2.1 STAROVĚK

- Kolem roku 4 000 př. n. l. se v Egyptě poprvé začalo používat meteorické železo k výrobě šperků, v Babylonu později k výrobě pracovních nástrojů.
- Egypťané se naučili těžit a zpracovávat železnou rudu. Jako redukční činidlo bylo používáno dřevěné uhlí. Teprve kolem r. 2 000 př. n. l. se v Číně objevila ocel, která se do Egypta dostala až o 800 let později.
- Důležitým objevem středověku bylo kolo (4 000 př. n. l.). To nahradilo valení dřevěných špalků a urychlilo tak pozemní dopravu.
- 700 př. n. l. byl v Řecku vyvinut kladkostroj umožňující zdvih břemena o tíze rovnající se dvojnásobku síly na taženém konci lana.
- V Řecku také učenec Archimédes sestrojil kolem r. 250 př. n. l. šnekové čerpadlo (tzv. Archimédův šroub) sestávající z rotoru se šroubovicí. Ten se otáčel ve válcové trubce a tím posouval vodu vzhůru.
- Další objevy přišly z dálného východu. Známé jsou především papír, inkoust nebo kompas.

### 2.2.2 STŘEDOVĚK

- Církevní mystika a dogmatismus středověku bránila rozvoji společnosti a šíření vzdělanosti. Zakládaly se sice první univerzity, ale veškerá jejich činnost směřovala opět k náboženským vědám. Teprve pozdější rozvoj přírodních věd vytvořil předpoklady pro vývoj moderní techniky.
- Hlavní pohonnou jednotkou bylo až do 19. st. vodní kolo. Využívalo se například k pohonu měchů u šachtové pece ve slévárnách nebo pro výrobu potrubí pro rozvod vody (Francie - 17. st.). Tato vodní kola dosahovala vesměs malé účinnosti do 20 %, dnes se však jejich sofistikovanější varianty (Poncelotovo a Zuppingerovo kolo) používají k pohonu malých vodních elektráren a jejich účinnost může dosáhnout až 85 %.
- Významným pokrokem středověku byl přechod od ruční výroby k manufakturám. První se objevily ve 14. století v Itálii a postupně se rozšířily do Anglie a dalších zemí. Vznik manufaktur byl podmíněn dostatečným kapitálem a odbytem pro výrobu. Manufaktury byly předstupněm strojí výroby.

- Rychlejšímu předávání nových poznatků došlo díky výrobě papíru a knihtisku, ty byly do Evropy přeneseny z Číny.

### 2.2.3 PRŮMYSLOVÁ REVOLUCE

- Díky rychlému rozvoji mechaniky a chemie došlo v letech 1750 až 1840 k přechodu na průmyslovou strojovou výrobu.
- James Watt si nechal patentovat parní stroj, jehož základem je přeměna tepelné energie vodní páry na mechanickou práci. Parní stroj našel široké uplatnění v průmyslu i dopravě a stal se symbolem této doby.
- Zažíváme velký rozmach železniční dopravy a začínají se objevovat první parní automobily.
- Velký pokrok zaznamenalo také zpracování materiálů, zejména obrábění. Koncem 18. st. byl sestaven soustruh umožňující řezání závitů a má již všechny prvky soudobých strojů (lože, vřeteník, suvný koník, suport s nožem a vodící šroub).
- V 19. století doplnily páru další energetické zdroje (spalovací motory a elektřina). Roku 1860 byl ve Francii patentován první spalovací motor poháněný svítiplynem (Étienne Lenoir). 1883 pak Wilhelm Maybach postavil svůj čtyřdobý zážehový motor, který byl již vhodný i pro pohon automobilů. [5]

### 2.2.4 20. STOLETÍ

- Další rozvoj zejména v automobilové dopravě, Maybach-Daimler a dnešní Tatra Kopřivnice vyrábí své první automobily. V Americe je to Henry Ford a jeho Model T (1912)
- Stroje již nejsou poháněny přes transmise a dostávají samostatný pohon. Tento trend trvá dodnes (elektromotory).
- V 30. letech se staly předmětem zkoumání metody návrhu strojů, a to především ve vyspělých průmyslových zemích (např. Německo). Problematikou se zabývaly katedry vysokých škol, na které přicházely osobnosti z vedoucích míst strojírenských podniků a postupně byly formovány základy disciplíny nazvané jako metodika konstruování. [6]

Přes všechny tyto pokroky se však neměnily metody konstruování, které byly i nadále založeny na intuici, zkušenosti a citu konstruktéra. Nad těmito otázkami se však zamýšlelo mnoho vynikajících vynálezců a konstruktérů již s nástupem průmyslové revoluce. Protože jde o otázky spojené s kvalitou myšlení, myšlenkových pochodů, s racionálním myšlením a jednáním lidí, byly tyto problémy zkoumány i filozofy, pedagogy a přírodovědci.

Nad metodami konstruování se zamýšlí např. F. Redtenbacher v knize *Principen der Mechanik und des Maschinenbaues* z r. 1852. Uvádí zde, že tvary a rozměry součástí mohou být stanoveny citem, výpočtem nebo jejich kombinací.

Racionální metody tvůrčí konstrukční práce se vytvářely dlouhou dobu a postupně se zformovaly do disciplíny označované nejčastěji jako metodika konstruování. Utvořeny byly v době, která se již bez takového nástroje nemohla obejít, v důsledku mimořádného urychlení rozvoje průmyslu, zejména strojírenství, v období mezi první a druhou světovou válkou.



Vývoj probíhal souběžně ve všech vyspělejších státech. První kurzy s touto náplní pořádala General Electric v 30. letech v USA. Jednoznačně nejpokrokovější zemí bylo Německo. Zdejší konstruktéři se zabývali metodickými otázkami, publikovali a přicházeli jako profesori na vysoké školy. [7]

## 2.3 PŘÍSTUPY K NÁVRHU

V současnosti je nejvíce využíváno zkušeností, které konstruktér získal praxí nebo studiem. Zkušenosti získané praxí jsou přitom cennější. Nejrozšířenější a nejpoužívanější metody konstruování jsou intuitivní metody, metoda pokus-omyl, procedurální a vědecký (Hubka) způsob konstruování. [8] Porovnání z hlediska náročnosti jednotlivých přístupů znázorňuje obr. 1.

Dnes mají konstruktéři, díky rozšíření výpočetní techniky poměrně rozsáhlou sadu nástrojů, které jim pomáhají při řešení konstrukčních problémů. Z jednoduchých kreslicích programů se vyvinuly komplexní softwarové aplikace pro strojírenství, zejména pro navrhování strojních uzlů. Ani tak se však dnešní konstruktér neobejde, bez vědecko-technického základu, odborné literatury, katalogů výrobců apod. Konstruktér si tedy volí způsob, kterým bude postupovat a na základě dostupných nástrojů upravuje celý proces návrhu konstrukce, který je blíže popsán níže.

### VÝPOČETNÍ NÁSTROJE

Software pro počítačovou podporu konstruování (CAD – Computer Aided Design) umožňuje na základní úrovni vytvářet výkresovou dokumentaci budoucího výrobku. Reálný objekt je reprezentován potřebným počtem 2D pohledů, řezů, detailů apod. Pokročilejší CAD programy pracují s prostorovou reprezentací objektů. Tyto 3D CAD modely pak často slouží ke generování 2D výkresové dokumentace, ale také se používají k vytváření montážních postupů a analýze kolizí v sestavách.

Modely vytvořené v CAD programech se dále uplatňují i v dalších etapách životního cyklu výrobku, například v oblasti počítačové podpory výroby CAM (Computer Aided Manufacturing), 3D modely jsou také využívány pro Rapid Prototyping (RP), což je soubor technologií určen pro rychlou prototypovou výrobu. Zde můžeme zmínit například metody 3D tisku (FDM, SLA, SLS).

Další výhodou CAD modelů je to, že umožňují rychlé a přesné výpočty některých fyzikálních charakteristik. Modely mohou, kromě geometrie, obsahovat i informace o materiálových charakteristikách těles, které pak mohou být využity při inženýrských analýzách a simulacích. K dispozici je řada softwarových balíků CAD. Mezi nejpoužívanější patří SolidWorks, Autodesk Inventor, Catia nebo SolidEdge.

Pro řešení celé řady inženýrských problémů je často využívána metoda konečných prvků (MKP), která dnes zaujímá dominantní postavení mezi numerickými metodami a umožňuje řešit úlohy statiky, dynamiky, pružnosti, přestupu tepla a další. Další využívanou metodou je metoda konečných objemů (MKO), používaná zejména pro řešení úloh proudění.

Příkladem konstruktérských výpočtářských systémů může být ANSYS, ADINA, ABAQUS nebo MSC Nastran. [1]

### **2.3.1 METODA POKUS-OMYL**

Podle (Szlachta, 2007) je z hlediska myšlenkové náročnosti nejjednodušší metodou řešení koncepčně strukturních problémů. Metoda spočívá v realizaci řešení bez přílišných metodických rozborů. Pokud následně zhotovený prototyp nesplňuje zadané požadavky, proces se opakuje. Už z popisu lze tedy usoudit, že při náročnějším zadání může být tato metoda velmi náročná na čas a prostředky.

### **2.3.2 METODY INTUITIVNÍ**

Vyšším stupněm řešení koncepčně-strukturních problémů je použití intuice. Tento typ řešení vzniká podvědomě v důsledku inspirace, fantazie nebo představ po důkladném seznámení s konstrukčním úkolem. Konstruktor zde využívá své zkušenosti a řešení, které zná z praxe a osvědčily se. Intuici můžeme rozdělit na podmíněnou nebo provokovanou. [9]

#### **PODMÍNĚNÁ INTUICE**

Konstruktor napadne řešení samo od sebe. Jedná se většinou o okamžitý nápad.

#### **PROVOKOVANÁ INTUICE**

Nápady jsou provokované úmyslně. Existuje několik metod provokované intuice [8]:

- Brainstorming
- Metoda 365
- Synektická metoda
- Metoda Gorgona
- Metoda Delfi
- Metoda Philips 66

### **2.3.3 PROCEDURÁLNÍ KONSTRUOVÁNÍ**

Konstruování vycházející z předepsaných norem (VDI 2221). Tuto směrnici vydalo sdružení německých inženýrů (VDI). Směrnice dává doporučení, jak rozdělit konstrukční proces do několika transparentních a racionálních kroků. Směrnice také ukazuje systematickou proceduru od první analýzy a poznávání problému přes dekompozici na dílčí podproblémy a jejich řešení až po celkové řešení. Ne vždy lze tento přístup aplikovat. [9]

### 2.3.4 VĚDECKÉ KONSTRUOVÁNÍ

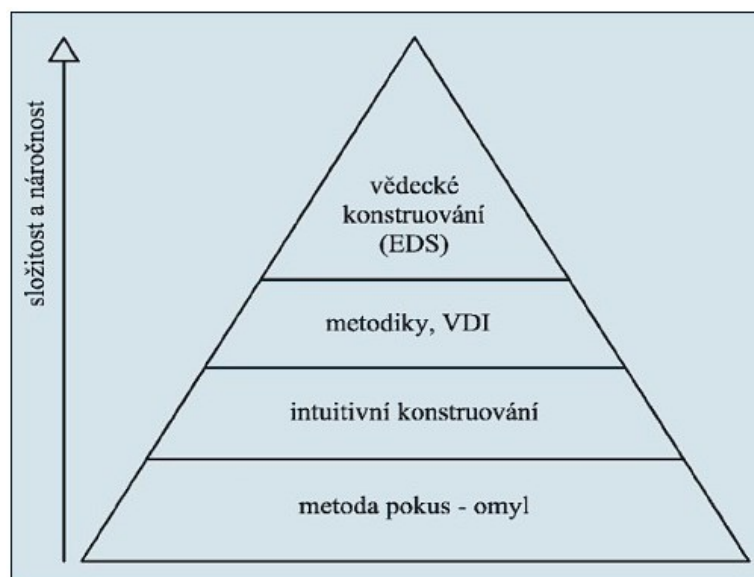
Jde o systematické myšlení, které vychází ze současného stavu vědeckého poznání jevů a procesů a z logiky zákonitosti vývoje analyzovaných problémů. Společným metodickým základem systematického způsobu tvořivosti jsou vědecké metody poznání.

Pro projekt jako celek, potřebujeme víc variant řešení, dostatek času a prostředků. Řešení hledáme systémově s teoretickou podporou poznatků. Technický objekt rozdělujeme do konkrétních fází a kroků a stanovujeme jejich optimální posloupnost. Cílem je nalézt optimální řešení s minimálními náklady v co nejkratším čase.

Hlavní fáze procesu jsou:

- Analýza
- Syntéza
- Abstrakce a zevšeobecnění
- Konkretizace
- Indukce a dedukce
- Úsudek

Řešení úkolu je syntéza poznatků získaných analýzou nebo abstrakcí z reálných skutečných jevů. Jde o vědecky orientovaný myšlenkový proces postupného vytváření hypotéz s předvídáním účinků. [10]



Obr. 1 Náročnost konstrukčních metod [9]

### 2.3.5 POROVNÁNÍ METOD A JEJICH VYUŽITÍ

Vždy je důležité vybrat správnou konstrukční metodiku. Každý typ se používá k řešení jiných typů úkolu, a dokonce jsou svázány i náročností zadaného problému. Například metoda pokus-omyl se může rychlostí vyrovnat v návrhové etapě technického objektu, při testování prototypu však může dojít velkému zpomalení a v důsledku toho také prodražení návrhového

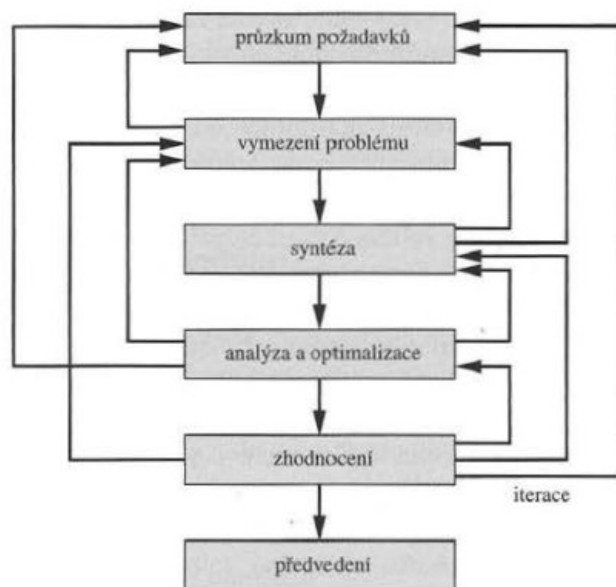
procesu. Tato metoda se zdá být pro dnešní dobu neefektivní pro složitější aplikace, ale T. A. Edison s její pomocí vynalezl žárovku. Před jejím patentováním však potřeboval více jak 6000 prototypů.

Metody intuitivní se využívají rovněž zejména v návrhové etapě, poté se však často doplňují využitím CAx technologie, protože se také potýkají náročnými zpětnými změnami a inovacemi výrobků. Při využití těchto metod je důležité zohlednit předchozí zkušenosti konstrukčního týmu. Nejvyužívanější metodou v automobilovém a leteckém průmyslu je konstruování procedurální. V průběhu konstrukčního procesu se postupuje přesně dle metodiky a těžko se doplňuje o další metody konstruování. Systémový přístup se vhodný pro tvorbu změn a inovací výsledného produktu. Touto metodou mohou pracovat zkušení konstruktéři, ale určité dílčí úkoly mohou vykonávat také absolventi bez praxe.

Konstrukční metody se musí vzájemně doplňovat. V praxi se často setkáváme s kombinací několika metod řešení technických úloh. U většiny konstrukčních procesů se používá intuice v návrhové etapě a následně se pokračuje systémovým přístupem. Firmy a konstruktéři si také vytvářejí vlastní přístupy k řešení konstrukčních problémů, kde se opět zohledňují zkušenosti a znalosti konstruktéra. Můžeme však říci, že nejlepších výsledků dosahují zpravidla jedinci se zájmem o svůj obor, rozvíjení vlastních dovedností a mají dobrý technickovědecký základ.

## 2.4 POPIS VÝVOJE VÝROBKU

Existuje více druhů návrhového procesu výrobku. Vždy záleží na typu výrobku, zde bude popsán nejdříve klasický návrhový proces vývoje strojní součásti a následně porovnána s variantou zahrnující některé z moderních metod návrhu.



Obr. 2 Klasický proces vývoje výrobku [1]

## PRŮZKUM POŽADAVKŮ

Každý návrhový proces vždy začíná průzkumem požadavků a rozhodnutím, jak na tyto požadavky reagovat. Počáteční formulace problémů bývá často ve tvaru nepřímá. Zákazník má například problém s nadměrnou hlučností stroje nebo stroj přenáší vibrace do okolí.

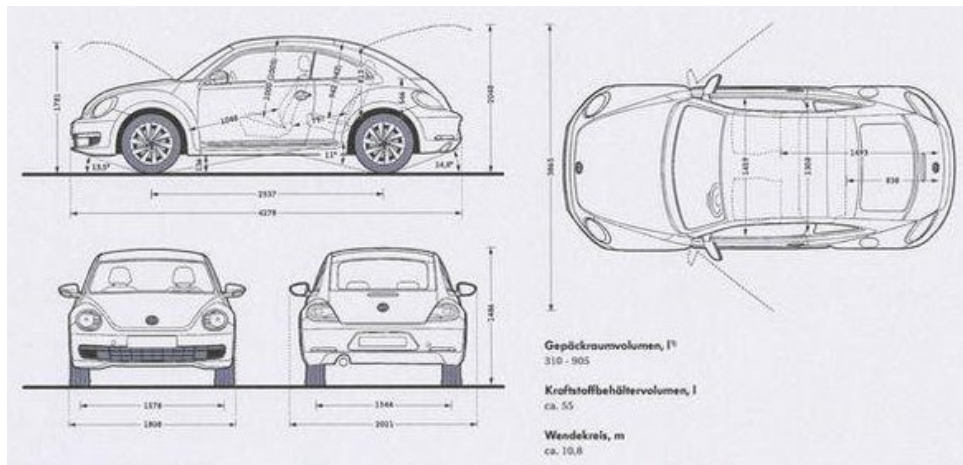
## VYMEZENÍ PROBLÉMU

V této fázi návrhového procesu dochází ke zpřesnění návrhových požadavků. Vymezení problému musí zahrnovat všechny technické podmínky stanovené pro navrhovanou součást. Podmínkami jsou vstupní a výstupní podmínky, charakteristiky a rozměry v prostoru navrhované součásti. Podmínky blíže určují cenu, spolehlivost a očekávanou životnost.

Některé podmínky vyplývají z konstruktérova okolí. Dostupnost výrobních procesů s celkovou vybaveností podniku přímo ovlivňují tvorbu konceptu jsou součástí technických podmínek. [1]

## SYNTÉZA

Syntéza, jinak také tvorba konceptu, je první fáze samotného návrhu, ve které se spojí informace o problému a nápady konstruktéra. Jejím výstupem jsou náčrty, analytické a pevné modely. Ty slouží především k prvotní vizualizaci a analýze funkčnosti konceptu.



Obr. 3 Computer Aided Sketch [11]

## ANALÝZA A OPTIMALIZACE

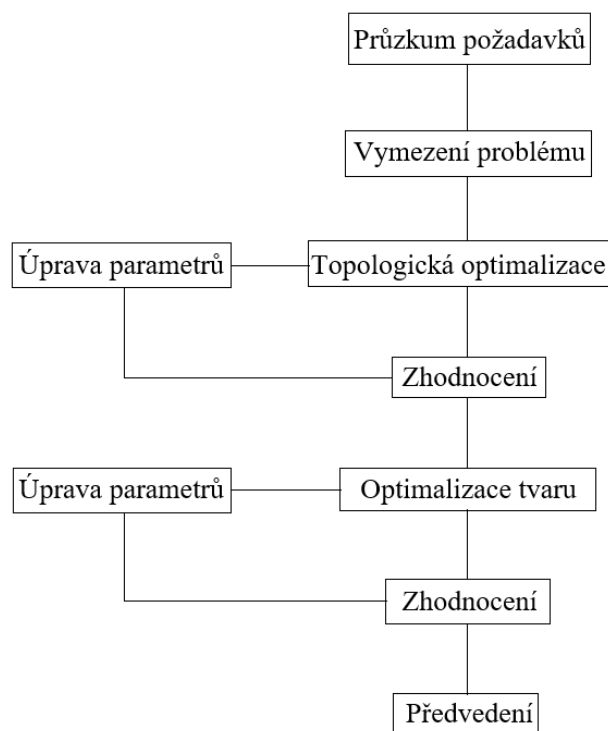
Dalším krokem je analýza vyhodnocující provedení návrhu. Zkoumá se design jednotlivých elementů součástí a také například síly působící na objekt. Vyhovující návrhy jsou dále optimalizovány, nevyhovující vráceny do předchozí fáze, kde mohou být upraveny některé parametry. Tak můžeme zkoumat jejich vliv na konstrukci. K analýze a optimalizaci se využívají abstraktní výpočtové modely soustavy, které simulují její chování. [1]

## ZHODNOCENÍ

Důležitou součástí návrhového procesu je zhodnocení návrhu. Obvykle sestává z laboratorních nebo provozních zkoušek prototypu, v dnešní době se však do popředí dostávají tzv. virtuální prototypy, které lze analyzovat pomocí CAE programu. Zjišťuje se, zda výrobek opravdu vyhovuje zadaným požadavkům, jestli je spolehlivý nebo jaká bude jeho opravitelnost a údržba. Navrhování je iterační proces, tudíž pokud návrh v této fázi nesplňuje předepsané požadavky, vrací se dle diagramu na obr. 2 zpět k fázi optimalizace nebo tvorbě konceptu.

## PŘEDVEDENÍ

Koncová fáze návrhu se týká hlavně vyjádření výsledků návrhu a předběžné přípravy na následující produkci. V této fázi jsou prostřednictvím renderů, rozměrových výkresů, výkresů dílů, konstrukčních výkresů atd. podrobně a kompletně prezentovány výsledky návrhu (příklad výkresu je vyobrazen na obr. 3). Tímto způsobem je výše uvedený návrhový proces prezentován a uzavřen. Tyto výstupy také poskytují základ pro výrobu a konstrukci po fázi návrhu.



Obr. 4 Proces vývoje výrobku s využitím TO

Na obrázku výše lze vidět diagram vyobrazující vývoj výrobku pomocí optimalizace topologie a tvaru. V takovém případě jsou zachovány první dvě fáze procesu (průzkum požadavků a vymezení problému), avšak tvorbu konceptu zde zastoupí algoritmus TO (topologické optimalizace). Pokud je řešení vyhovující, návrh pokračuje optimalizací tvaru.

V opačném případě, je třeba upravit vstupní parametry topologické optimalizace. Důležité parametry topologické optimalizace jsou blíže popsány v kapitole 3.4.

Po optimalizaci tvaru následuje další zhodnocení dosažených výsledků. Pokud výstup tvarové optimalizace neodpovídá představám konstruktéra, tato fáze se opakuje. Konečnou fází tohoto procesu je opět předvedení výrobku a jeho předání výrobě.

### 3 MODERNÍ METODY NÁVRHU V KONSTRUOVÁNÍ

Vývoj různých výpočetních a simulačních programů s sebou přinesl i nové možnosti v návrhu konstrukcí. V této části jsou popsány některé z nich, zejména topologická optimalizace. Ta bude detailněji popsána v kapitole 3.4 a 3.7.4.

Jednou z častých metod využívaných v konstrukci je strukturální optimalizace (structural optimization). Ta se využívá za účelem zlepšení požadovaných vlastností. Výsledkem dobře provedené strukturální optimalizace bývá součást, která má co nejnižší hmotnost, vysokou tuhost a odolnost. Cílem optimalizace však může být také lepší vyrobitelnost nebo snížení výrobních nákladů. Ještě předtím, než budou popsány jednotlivé metody optimalizace, je potřeba definovat následující pojmy:

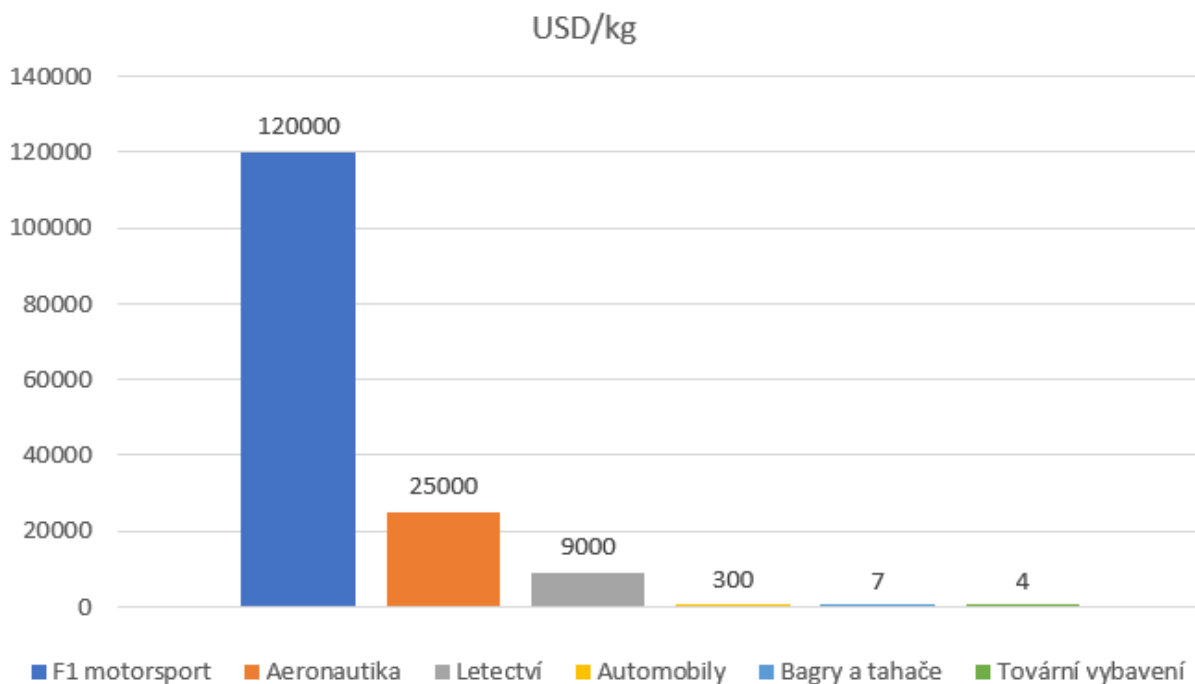
- Cílová funkce – definuje cíl optimalizace. Skalární hodnota návrhové odezvy (např. maximální napětí, maximální posunutí).
- Okrajové podmínky – dodatečná omezení návrhové odezvy. Lze například určit, že objem bude redukován o 45 %, nebo že maximální hodnota posunutí bude rovna 1 mm.
- Návrhové proměnné – parametry, které se mění v průběhu optimalizace (např. hustota elementů – topologická a tloušťka skořepiny – rozměrová optimalizace).
- Návrhový prostor – oblast modelu, ve které optimalizace pracuje.

Optimalizací můžeme do návrhu zasáhnout v různých částech jeho vývoje, podle toho, co od ní očekáváme. Největší možnosti pro ovlivnění výsledného tvaru výrobku se nachází v koncepční fázi, kdy jsou okrajové podmínky nejmírnější. Mezi koncepční strukturální optimalizace patří například již zmíněná topologická nebo topografická optimalizace.

Velký prostor pro optimalizaci v koncepční fázi nabízí aditivní technologie výroby. Nabízí obrovskou flexibilitu při návrhu geometrie, kterou jí lze vyrobit, zatímco tradičnímu výrobními metodami, jako je například lití nebo obrábění, takto složité struktury vyrobit nelze. Unikátní možností 3D tisku je výroba dílů s porézní mřížkovou strukturou, které mají řadu žádoucích vlastností. Taková struktury se vyznačují nízkou hmotností, a jelikož může chladící médium procházet prakticky celým objemem součásti, zlepšují se také tepelné vlastnosti konstrukce. [12]

Graf na obr. 5 ukazuje, jak je úspora hmotnosti pro vybraná průmyslová odvětví důležitá z hlediska ceny. Obecně můžeme říci, že úspora bude významnější u strojů využívající vyšší rychlosti a zrychlení.

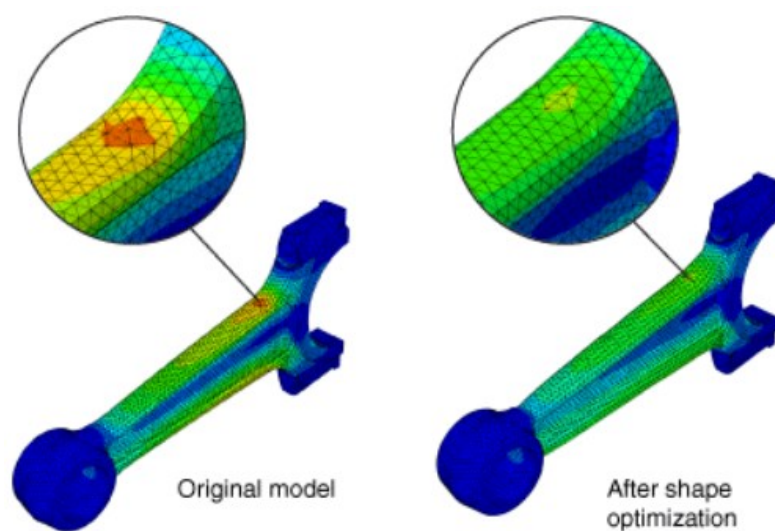




Obr. 5 Závislost nákladů na hmotnosti konstrukce

### 3.1 OPTIMALIZACE TVARU

Tento typ optimalizace se používá na konci návrhového procesu, kdy už je známá celková topologie konstrukce. V konstrukci však mohou vznikat místa s velkou koncentrací napětí, které je potřeba odstranit. Dochází tedy pouze k úpravě povrchové sítě součásti, tak jak lze vidět na obr. 6. Pro proces je typicky potřeba model vytvořený MKP analýzou napětí nebo MKP model vygenerovaný pomocí topologické optimalizace. [13]

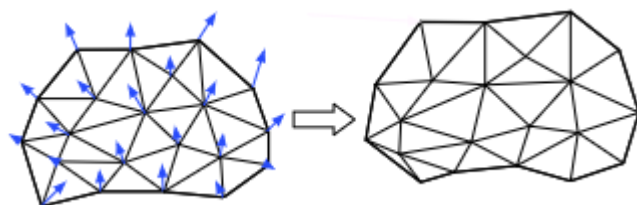


Obr. 6 Efekt optimalizace tvaru [14]

Při optimalizaci dochází k minimalizaci objektivní funkce vystavené určitým omezením. Všechny funkce se vztahují k návrhovým proměnným, což jsou souřadnice hraničních bodů optimalizovaného objektu. Proces optimalizace tvaru se skládá z několika kroků.

Na začátku optimalizace musí být definována geometrie zkoumaného objektu. Hranice objektu jsou modelovány pomocí kubických B-splajnů, které jsou definovány sadou klíčových bodů. Některé souřadnice těchto klíčových bodů budou návrhovými souřadnicemi, které na sobě mohou, ale také nemusí být závislé. K vytvoření úplného a platného MKP modelu se používá automatický generátor sítě (mesh generator). Poté se provede MKP analýza a vyhodnotí se posunutí a napětí. V případě využití gradient-based řešiče se citlivost podmínek a objektivní funkce počítají buď pomocí semianalytické metody nebo metody konečného rozdílu.

Optimalizace je ukončena. Návrhové proměnné jsou optimalizovány a je definován nový tvar objektu. Pokud bylo splněno konvergenční kritérium optimalizačního algoritmu, pak je nalezené řešení optimální a proces je ukončen. V opačném případě je navržena nová geometrie a proces se opakuje. [15]



Obr. 7 Deformace sítě a posunutí klíčových bodů [16]

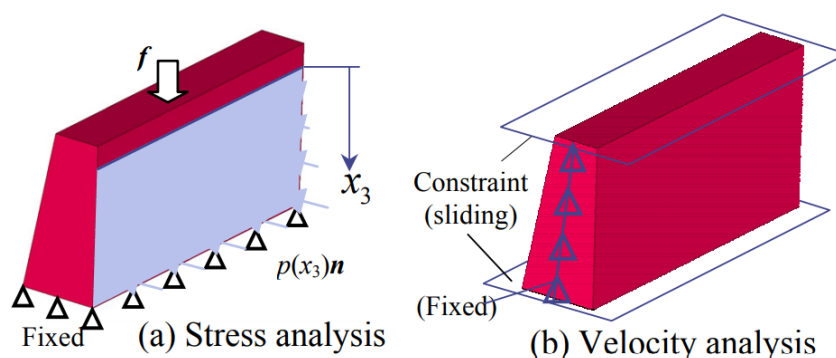
Základní vlastnosti optimalizace tvaru:

- Změna tvaru hranic modelovaného objektu
- Vyžaduje zamyšlení nad formulací problému
- Nevyžaduje přesíťování
- Gradientní metoda

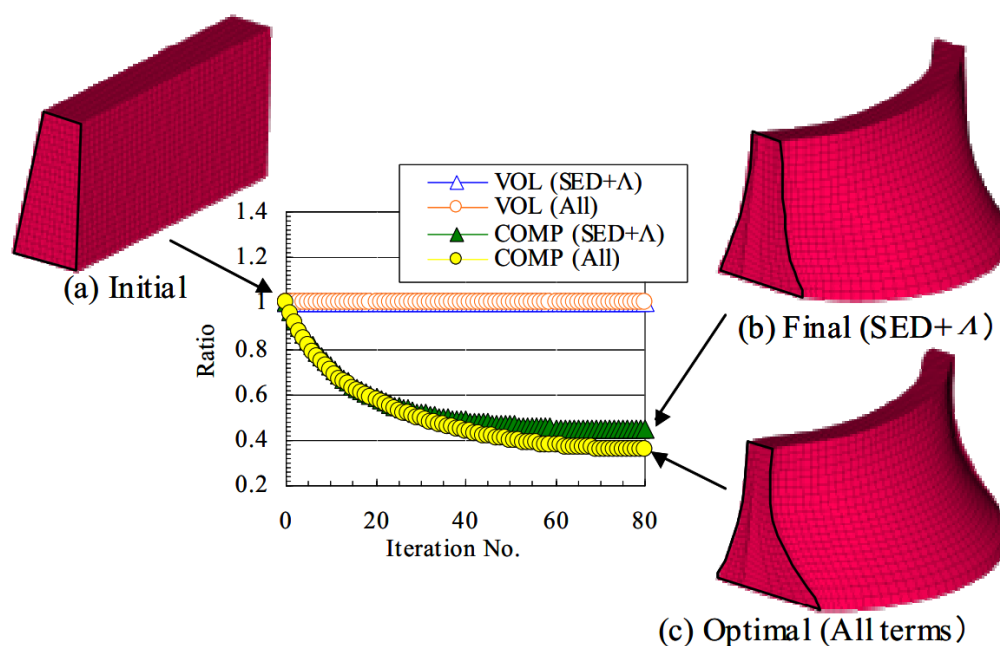
Software pro optimalizaci tvaru:

- Fusion 360
- MSC Nastran
- Comsol Multiphysics
- Ansys
- Tosca Structure

Příklad optimalizace tvaru, který je popsán v (Shimoda a kol., 2009), můžeme vidět na obrázcích obr. 8 a obr. 9, kde na obr. 8 jsou znázorněny zadané okrajové podmínky. Na obr. 9 je znázorněna historie iterací a výsledný tvar.



Obr. 8 Okrajové podmínky optimalizace tvaru hráze [17]



Obr. 9 Optimalizace tvaru hráze [17]

### 3.2 ROZMĚROVÁ OPTIMALIZACE

Podobně jako optimalizace tvaru, se rozměrová optimalizace využívá především na konci návrhového procesu, kdy už je dáno rozvržení součásti a není tedy možné radikálně měnit její tvar. Při rozměrové optimalizaci hledáme optimální vztah mezi vahou, tuhostí a dynamickým chováním součásti, přičemž se zabýváme příčnými řezy jednotlivých částí konstrukce a tloušťkou stěn.

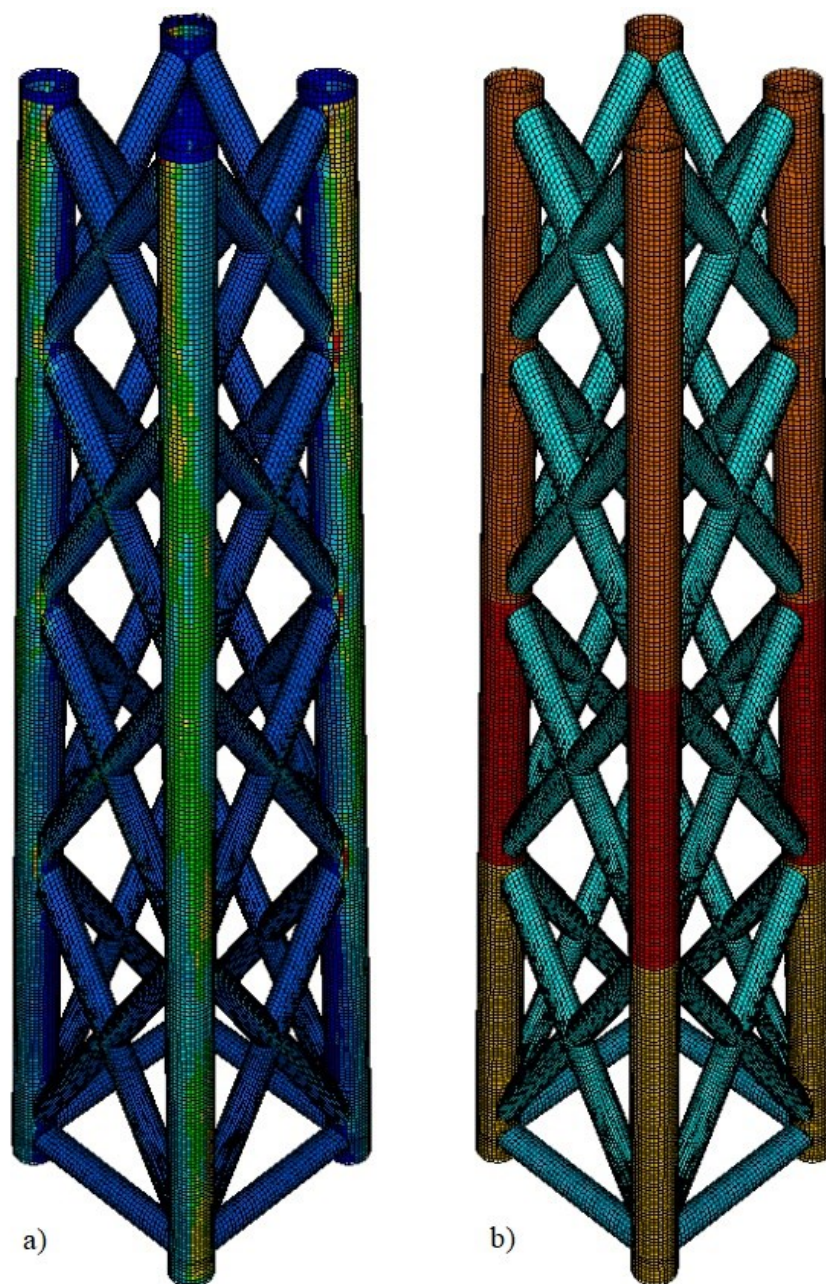
Pro optimalizaci je nejdůležitější výběr návrhové oblasti a určení okrajových podmínek, na základě kterých je určena tloušťka jednotlivých prvků. Tento návrh by měl splňovat všechny mechanické požadavky a často představuje zároveň návrh s optimální hmotností. Při optimalizačním procesu mohou být zvoleny tyto cílové funkce: [18]

- Tuhost
- Vlastní frekvence

- Vnitřní a reakční síly
- Těžiště
- Moment setrvačnosti

Při optimalizaci můžeme využít buď tzv. free sizing, při kterém tloušťky jednotlivých stěn představují samostatnou proměnou, tudíž se při návrhu mohou měnit nezávisle na sobě, a nebo tzv. clustering, kdy jsou k sobě svázány elementy se stejnou tloušťkou. Druhé metody se využívá například při návrhu svařence, jehož konstrukci tvoří plechy o stejné tloušťce. Obecně se pro maximální efektivitu návrhu optimalizuje nejprve free sizing přístupem a na základě výsledků se určí, které části konstrukce je třeba svázat v druhé fázi. [14] Výstupem rozměrové optimalizace je návrh konstrukce s novou tloušťkou stěny, skořepiny. Ten je dále peveden zpět do CAD modelu.

Obr. 10 reprezentuje porovnání obou možností optimalizace popsané v [19], provedené ze stejného počátečního návrhu. V prvním případě (a) došlo k nárůstu kritériální funkce o 41 %, v případě (b) pouze o 15 %. V obou případech však byla zachována původní hmotnost konstrukce.



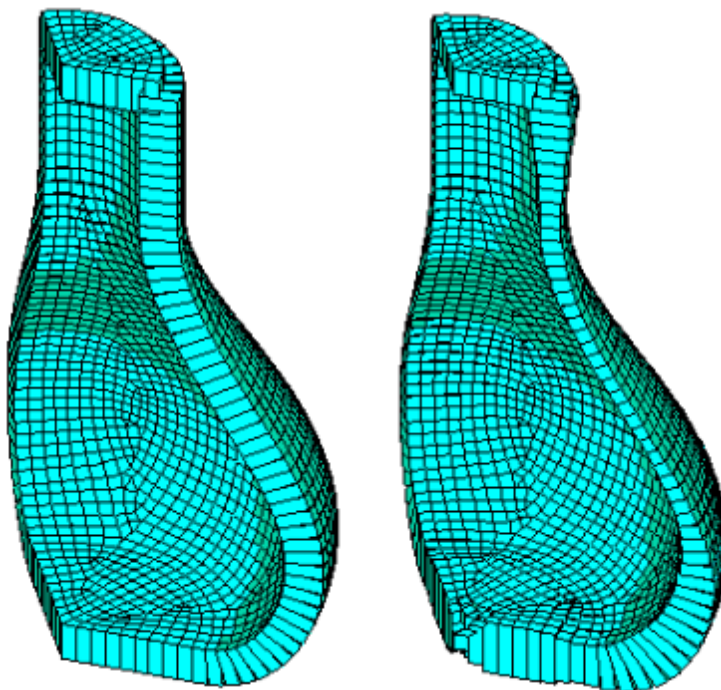
Obr. 10 Změna tloušťky optimalizované konstrukce a) free sizing b) clustered sizing (upraveno) [19]

Základní vlastnosti rozměrové optimalizace:

- Pracuje s geometrií CAD modelu
- Jednoduchá na nastavení
- Vyžaduje přesíťování v každé iteraci
- Gradient-free metoda
- Řešením je CAD model



Možnost rozměrové optimalizace je součástí většiny MKP programů jako jsou například MSC Nastran, Ansys, Simulia Tosca Structure atd. Na obrázku níže je vidět ukázka rozměrové optimalizace v programu MSC Nastran. Na tomto příkladu můžeme dobře vidět několik funkcí, které lze nastavit. Využívá se zde symetrie, proto optimalizace probíhá pouze s třetinovým modelem. Z obrázku je také zjevné, že tloušťky elementů víka lahve byly svázány. Tloušťka stěny byla omezena podmínkou minima a maxima. [18]

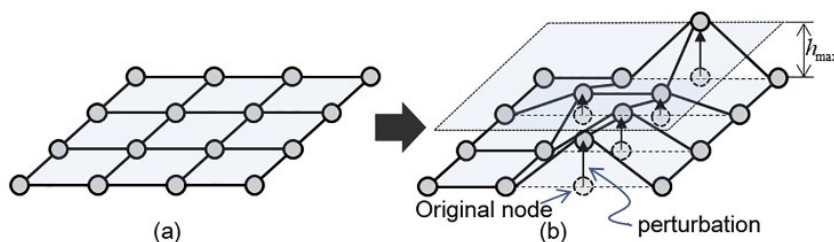


Obr. 11 Rozměrová optimalizace v MSC Nastran  
(vlevo-základní model, vpravo-optimalizovaný model) [18]

### 3.3 TOPOGRAFICKÁ OPTIMALIZACE

Pomocí topografické optimalizace (topography/bead optimization) můžeme do upravovat geometrii skořepin. Do geometrie přidává prolisy a tím zvyšuje celkovou tuhost konstrukci a zvyšuje její vlastní frekvenci. Navrhnuté prolisy v kovových dílech lze lehce reprodukovat pomocí lisu. Optimalizace tedy nepřidává konstrukci další hmotnost a její následná realizace nevyžaduje velké náklady. [20]

Topografická optimalizace je v podstatě specifický typ optimalizace tvaru. Při obecné optimalizaci tvaru mohou být klíčové body přeskupeny v jakémkoliv směru, zatímco při topografické optimalizaci se mohou z původní polohy posunout pouze v ose  $z$  o maximálně o  $h_{max}$  (obr 14). Cílové funkce je při procesu topografické optimalizace dosaženo v rámci několika iterací.



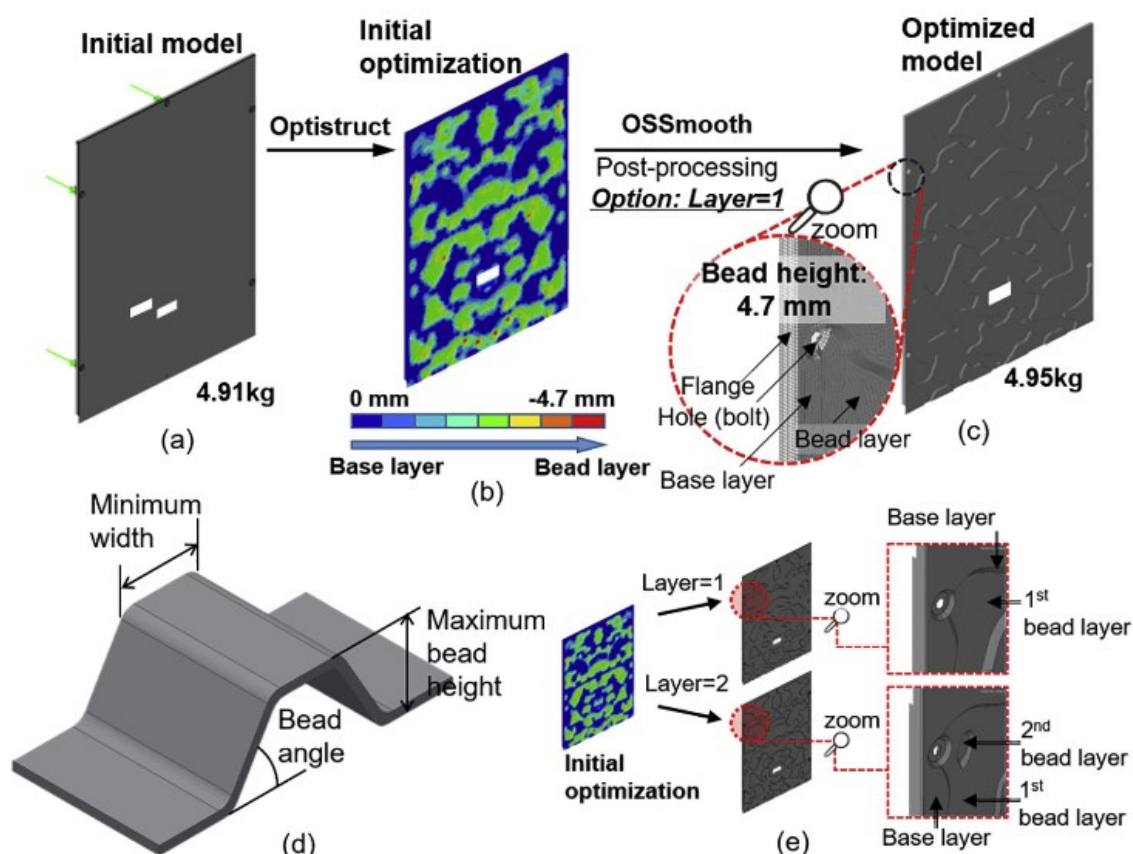
Obr. 12 Princip topografické optimalizace: a) Počáteční model b) optimalizovaný model, kde  $h_{max}$  = maximální výška prolisu [21]

Pro zjednodušení výroby optimalizace nabízí tři typy rozložení prolisů (lineární, kruhový, radiální), ale lze ji provádět i bez těchto nastavení. Vstupem topografické optimalizace bývá nejčastěji buzení modelu kmitáním o určité frekvenci, síla nebo tlak působící na těleso. Optimalizačním procesem se upraví vlastní frekvence modelu a také se zvýší jeho tuhost. Další možností je optimalizace maximálního posunutí v kritických bodech. Jak už bylo zmíněno výše, optimalizací nedochází k markantnímu změně váhy modelu, typicky se jedná o jednotky nebo desetiny procent. Narozdíl od klasické optimalizace tvaru nebo topologické optimalizace, kde se tyto hodnoty pochybují i v desítkách procent, avšak v těchto případech se jedná zejména o úbytek dané hmotnosti.

Na obr. 13 lze vidět celý proces topografické optimalizace, ale také základní parametry, jejichž hodnoty je potřeba definovat. Jedná se o následující parametry prolisů [21]:

- Minimální šířka
- Maximální výška prolisu  $h_{max}$
- Úhel zkosení bočních stěn prolisů

Optimalizace na obr. 13 je provedena v prostředí Altair OptiStruct, tento druh optimalizace však nabízí také Simulia Tosca Structure, Ansys nebo MSC Nastran. Na obr. 13 a) vidíme počáteční model desky která, byla při optimalizaci zatížena budící silou, šroubové vazby po obvodu po obvodu byly považovány za ideálně tuhé. Následně byla provedena optimalizace ve zmiňovaném prostředí OptiStruct, jejíž výsledek ukazuje obr. 13 b). Výšky prolisů jsou zde rozlišeny pomocí barev. Protože by byl takto složitý tvar obtížně vyrobitelný, byl upraven v postprocesoru OSSmooth, obr. 13 c), který je součástí programu OptiStruct. Na obr. 13 e) lze vidět nastavení vrstev prolisů v OSSmooth. [21]

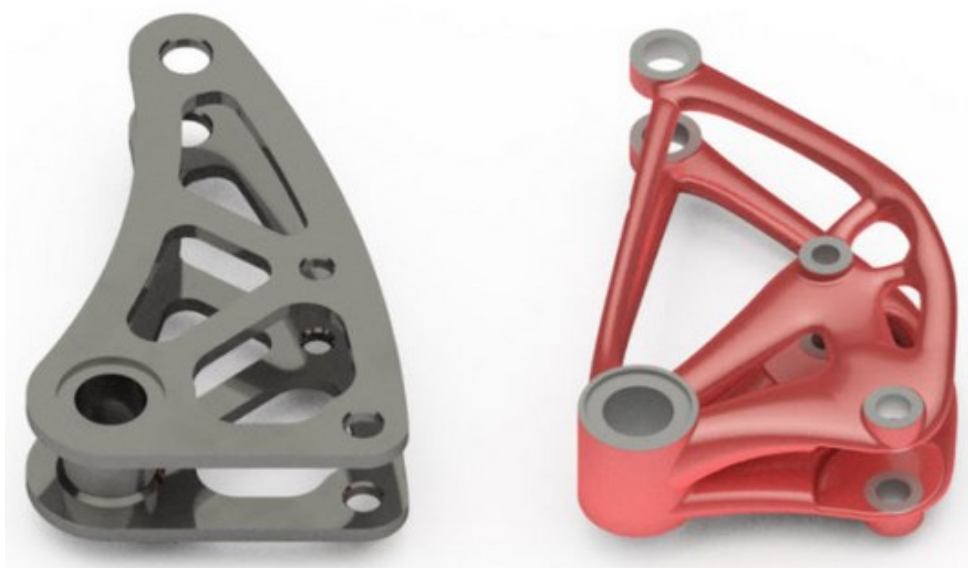


Obr. 13 Topografická optimalizace: a) Počáteční model b) Počáteční optimalizace OptiStruct c) Optimalizovaný model d) Uživatelem nastavené parametry optimalizace e) Možnosti nastavení vrstev v OSS Smooth [21]

### 3.4 TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE

Topologická optimalizace je relativně nový obor, který vděčí svému rozmachu hlavně zvyšování výpočetního výkonu počítačů a také úzce souvisí s vývojem aditivní technologie výroby. V průběhu topologické optimalizace dochází k úpravě geometrie konstrukce tak, aby výsledný objekt splňoval tzv. vedlejší podmínky. [22] Hlavním cílem optimalizace je redukovat množství potřebného materiálu a současně minimalizovat hmotnost konstrukce, tedy optimální řešení mezi tuhostí a množstvím materiálu. Teoreticky se totiž začíná od ideálního, matematicky efektivního řešení. [23] Iterační algoritmus provede konečný počet prvkových výpočtů a podle výsledku se upraví topologie. Výpočet se opakuje, dokud výsledek nevyhovuje zadaným podmínkám. Existuje také možnost nastavení konečného počtu iterací, aby nedošlo k nekonečnému cyklení. [24]





Obr. 14 Porovnání vahadla svařeného z plechů a vahadla navrženého pomocí TO [25]

### 3.4.1 PROCES TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE

Počáteční fáze topologické optimalizace zahrnuje poznávání vnějších podmínek. Vnější podmínky jsou takové, za kterých bude konstrukce sloužit svému účelu. Tím se rozumí vnější síly působící na konstrukci nebo její části. Řešením této části návrhu je množina veličin označovaná jako systémové prostředí  $P_s$ .

V dalším kroku návrhu stanovíme kritéria pro určení optimálního stavu návrhu a tím i ukončení samotné optimalizace. Optimální konstrukce může být definována jako „optimálním uspořádáním konstrukce (tj. její forma a rozměry) je takové uspořádání, které je dle jistým způsobem zavedeného hlediska nejlepší z třídy možností, které jsou přijatelné při daných vedlejších podmínkách.“ [26]

Jedno z nejčastěji používaných kritérií je poměr hmotnosti optimalizovaného objektu a objektu před optimalizací (Best Stiffness to Weight Ratio). Dalšími kritérii mohou být vlastní frekvence, tuhost nebo cena. Zvolená kritéria vyjádřená konkrétní číselnou hodnotou nazýváme návrhové proměnné a zapisujeme je jako sloupcový vektor  $x_N$ . [22]

Dá se říct, že jedním z nejdůležitějších krků topologické optimalizace je nastavení formy. Za formu považujeme část konstrukce, ve které následně probíhá samotná optimalizace. Na výsledku této fáze závisí celý průběh optimalizace. K definici formy využívá konstruktér své předchozí zkušenosti a schopnost předpovídat chování forem při daném zatěžovacím stavu.

Vhodnost formy závisí na vnějších podmínkách a kritériích. Je-li hlavním kritériem cena, forma musí počítat s menším počtem snadno výrobitelných členů, zatímco když vezmeme v úvahu především hmotnost, bude taková forma nevyhovující. [26]

Poté, co dojde ke specifikaci formy, dochází k volbě návrhových proměnných tak, aby popisovaly rozměry jednotlivých prvků, jejich vzájemnou orientaci a charakteristiky

materiálu. Definují se tři typy návrhových proměnných, které dále vyjadřujeme pomocí sloupcového vektoru  $x_n$ :

- rozměrové proměnné  $x_r$  (šířka a tloušťka různých rovinných prvků)
- tvarové proměnné  $x_t$  (počet a umístění uzlů konstrukce)
- materiálové proměnné  $x_m$  (vlastnosti materiálu formy – pružnost, hustota)

Další velmi důležitou fází procesu topologické optimalizace je stanovení vedlejších podmínek. Vedlejšími podmínkami mohou být například minimální tloušťka materiálu v určité části, maximální přípustné napětí v materiálu nebo maximální posuv určitého bodu při působení vnějších podmínek. Vedlejší podmínky jsou vyjádřeny nerovnicemi, kdy hodnoty daných veličin jsou menší nebo větší než určitá mezní podmínka. Tyto podmínky tak slouží pro zajištění, že například napětí v materiálu nepřeroste určitou mez, při níž by mohlo dojít k poškození celého objektu. Dalším možným příkladem využití těchto podmínek, v případě, že vedlejší podmínkou je podmínka maximálního posuvu, je limitace posuvu obvykle krajního bodu, u něhož je možné předpokládat největší posuv. Mezní posuv zmíněného krajního bodu může znamenat maximální možnou výchylku při výrobní činnosti stroje, při níž je stále možné považovat výrobek za vyhovující, tedy například maximální výchylka ramene automatizovaného svařovacího stroje při natažení ramene do maximální možné vzdálenosti. Vedlejší podmínky jsou tedy zpravidla zapisovány jako geometrické vedlejší podmínky, tedy [22]:

$$b_l \leq x_b \leq b_u \quad (1)$$

kde  $b_l$  představuje spodní mez proměnných vedlejších podmínek,  $b_u$  představuje horní mez proměnných vedlejších podmínek a  $x_b$  představuje vektor proměnných vedlejších podmínek. [22]

Posledním krokem před samotnou optimalizací je sestavení matematického modelu fyzikálně zjednodušené technické úlohy. Ten obsahuje nejen návrhové proměnné zvolené konstruktérem, ale také analytické proměnné, které označujeme  $x_A$  a vyjadřují například tenzor napětí, změnu tvaru, vlastní frekvenci apod. Tyto proměnné tak slouží k hlubší analýze optimalizovaného objektu. Analytické proměnné spolu s návrhovými proměnnými obvykle tvoří tzv. vektor proměnných úlohy, označovaný  $\mathbb{E}_p$ .

Následuje výběr vhodné metody topologické optimalizace a provedení samotné optimalizace. Na základě vnějších a vedlejších podmínek a vybrané formy se stanoví vhodná metoda topologické optimalizace. Každou úlohu totiž nelze řešit libovolnou metodou. Konstruktor volí takovou metodu, která poskytne dostatečně přesné výsledky v přípustném čase. Metody samotné topologické optimalizace jsou popsány níže. [26]

Pro dokončení procesu topologické optimalizace je ještě potřeba interpretovat získané řešení. V této fázi dochází typicky k ověření optimalizované konstrukce z hlediska vnějších a vedlejších podmínek. Dále zde probíhá konečná úprava konstrukce tak, aby vyhovovala výrobním možnostem.

### 3.4.2 METODY TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE

Topologickou optimalizaci lze rozdělit do dvou hlavních částí. První část se soustředí zejména na prutové a rámové konstrukce, jinak řečeno na konstrukce s malým objemovým zlomkem. Tento typ topologické optimalizace nazýváme optimalizací dispozice (Layout Optimization – LO).

Objektům s velkým objemovým zlomkem se věnuje Zobecněná optimalizace tvaru (Tzv. Generalized Shape Optimization – GSO nebo Variable Topology Shape Optimization), při které dochází současně k optimalizaci topologie a tvaru. K řešení GSO se nejčastěji využívá MKP a následujícím způsobem ji můžeme rozdělit podle typu používaných elementů. [27]

- ISE – izotropní pevný či prázdný element
- ASE – anizotropní pevný či prázdný element
- ISEP – izotropní pevný, prázdný či pórovitý element

kde jsou jednotlivé elementy charakterizovány takto:

- S – solid (Pevný element zcela vyplněný jedním materiálem)
- E – empty (Element neobsahuje žádný materiál)
- P – Porous (Element tvořený jedním materiálem a dutinou nebo prázdným prostorem)
- C – Composite (Skládá se z více druhů materiálu, ale neobsahuje dutiny)
- CP – Composite-Porous (Obsahuje více druhů materiálu a dutinu nebo prázdný prostor)

### METODA SIMP

Jednou ze tří nejpoužívanějších výpočetních postupů topologické optimalizace je metoda pevné izotropní struktury s penalizací pro střední hustoty (SIMP). Metoda se někdy také nazývá metodou umělé hustoty.

Iterační algoritmus analyzuje výsledky vstupní simulace MKP a k jednotlivým elementům sítě přiřazuje imaginární hustoty  $\rho_i \in (I; 0)$ , kde  $i$  je označení elementu.

- $\rho_i = 1$  – plný pevný element
- $\rho_i = 0$  – prázdný element

Problém je, že množina imaginárních hodnot je kontinuální a hodnoty mezi 0 a 1 komplikují řešení optimalizace. To se řeší penalizací. [23] Konečný návrh konstrukce má černé oblasti označující černou oblast, bílá oblast označuje dutiny a šedé oblasti značí přechodné hustoty (lze vidět na obr. 15). Tyto šedé oblasti se dají z konečného návrhu a následné výroby odstranit. [28]



Obr. 15 Příklad TO konzolového nosníku metodou SIMP [29]

## METODA OMP

Tato metoda využívá optimální mikrostruktury s penalizací pro střední hustoty. To znamená, že se nejdříve optimalizují řešení pro jednotlivé elementy s ohledem na dané podmínky (např. vedlejší podmínky nebo cílová funkce).

V případě dvourozměrných úloh máme pro každý element tři proměnné (dvě pro hustotu a jednu pro orientaci), u trojrozměrných úloh máme proměnných pět (tři pro hustoty a dvě pro orientaci). Pro ISE topologie však tato metoda neposkytuje dostatečnou penalizaci. Z toho důvodu je většinou nutná dodatečná penalizace.

## METODA NOM

Metoda NOM uplatňuje neoptimální nebo téměř optimální mikrostruktury bez dodatečné penalizace. Fakt, že jsou mikrostruktury neoptimální zaručuje určitý „fixní“ stupeň penalizace, ten však pro ISE topologie většinou není dostačující. Počet proměnných je obvykle nižší než u OMP, ale stále převyšuje metodu SIMP, kde pracujeme pouze s jednou proměnnou.

## VÝHODY A NEVÝHODY METOD PRO ISE TOPOLOGIE

ISE a IS jsou v praxi nejvíce využívané typy topologie, protože poskytují přesné, černo bílé rozložení materiálu bez pórovitých oblastí s nepatrnými vlákny, která jsou těžko realizovatelné při reálných aplikacích. [27] Navíc SIMP má schopnost pracovat s opravdu velkým objemem elementů a pokud použijeme dostatečně malý počet vnitřních podmínek, lze využít zároveň „perimeter control“ i nezávislé filtrování. [30]

Tab. 2 Porovnání metod topologické optimalizace

	SIMP	OMP	NOM
Mikrostruktura elementů	Pevná, izotropní	Optimální, nehomogenní	Neoptimální, nehomogenní
Dodatečná penalizace	ANO	ANO	Ne
Potřeba homogenizace	NE	ANO	ANO
Počet proměnných na jeden prvek	1	2D: 3-4 3D: 5-6	>1
Dostatečná penalizace	ANO	ANO	NE

Tab. 3 Výhody a nevýhody metod topologické optimalizace

SIMP	OMP	NOM
Výhody metod při práci s ISE a IS topologií		
Efektivita výpočtu, Vhodná téměř pro jakýkoliv design, Volně nastavitelná penalizace, Jednoduchost, nevyžaduje vyšší matematiku, Nevyžaduje homogenizaci, Řešení blízko globálního optima	Dodatečné informace o optimální ISEP topologii	Potenciálně méně proměnných než OMP
Nevýhody při práci s ISE a IS topologií		
Výsledek závislý na stupni penalizace	Výpočetně náročnější než SIMP, Vyšší matematika, Výsledek závislý na stupni penalizace, Vyžaduje homogenizaci, Nekonvexní úloha	Více proměnných než SIMP, Fixní penalizace, Nedostatečná penalizace, Nekonvexní úloha, Vyžaduje homogenizaci

### 3.5 MULTIDISCIPLINÁRNÍ OPTIMALIZACE

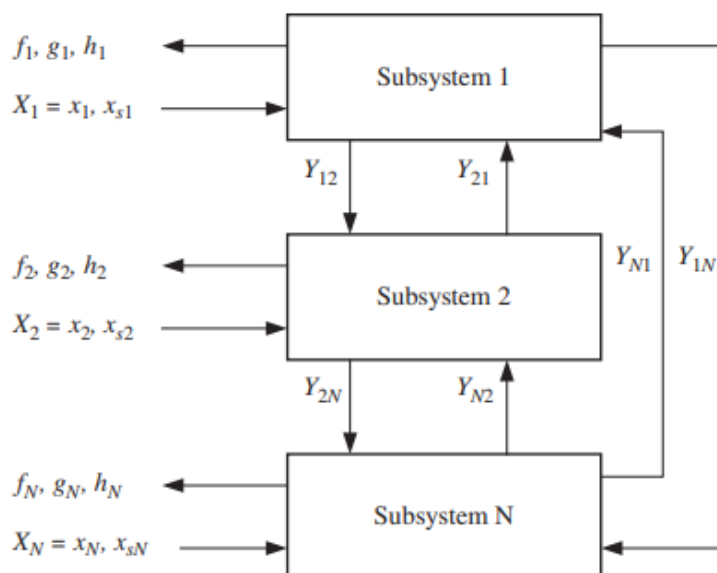
Návrh inženýrských aplikací někdy musí zahrnovat několik různých aspektů, jakými jsou náklady, životnost, strukturální vlastnosti, výrobitelnost apod. Každý z těchto aspektů většinou řeší příslušný tým odborníků. Tyto týmy pracují na typicky na svých úkolech s minimálním ohledem na ostatní týmy. To může znamenat velké kompromisy ve výsledném návrhu a také neustálou synchronizaci návrhů jednotlivých týmů. Multidisciplinární optimalizace (MDO) se snaží ušetřit zdroje, potřebné ke spojení jednotlivých návrhů. [12]

MDO je metodika optimalizace, zohledňující všechny zahrnuté disciplíny. Modely z každé disciplíny se používají v rámci jedné studie, přičemž každá z nich typicky využívá jiný simulační nástroj. Modely z těchto oborů budou mít některé společné proměnné návrhu a tyto proměnné jsou během studie vzájemně propojeny. [31]



Obr. 16 Aircraft MDO [32]

Aby mohl softwarový nástroj řešit MDO úlohy, musí být schopný komunikovat s mnoha dalšími programy. Také musí mít intuitivní uživatelské rozhraní, které nastavení takto komplexních studií usnadní. Příkladem takového softwaru může být Altair HyperStudy, jehož prostředí umožňuje přímou integraci MDO programů jako jsou HyperMesh, MotionView, Abaqus, Ansys, Fluent, OptiStrukt nebo Nastran. Díky tomu lze parametrizovat vstupní data konečných prvků, dynamiky těles a tekutin. [12]



Obr. 17 Schéma propojení jednotlivých disciplín při MDO [15]

V případě, že uvažujeme systém N-disciplín (obr. 17), každé pole schématu představuje modul, který k výpočtu svých výstupů využívá sadu vstupů. Tyto moduly představují jednotlivé disciplíny a výměnu informací mezi nimi za účelem vyhodnocení stavu systému.

Pro vyrovnaní rozdílů vstupů a výstupů se zavádí interdisciplinární konzistenční omezení. Jejich hodnoty jsou vypočteny na základě řešení jednotlivých optimalizací.

Každý podsystém je založen na disciplinární (vědní) analýze, znázorněné jako vztah vstupu a výstupu (obr. 17). Vektor  $X = \{x_1, \dots, x_N\}$  je vektor návrhových proměnných a  $x_s = \{x_{s1}, \dots, x_{sN}\}$  jsou proměnné nebo parametry, které jsou součástí více než jednoho podsystému.  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) považujeme za lokální návrhové proměnné disciplíny  $i$  a  $Y_{ij}$  ( $i \neq j$ ) za vazební proměnné získané z výstupu disciplíny  $i$  a zároveň tvořící vstup pro následující disciplínu  $j$ . [15]

## PŘÍSTUPY MDO

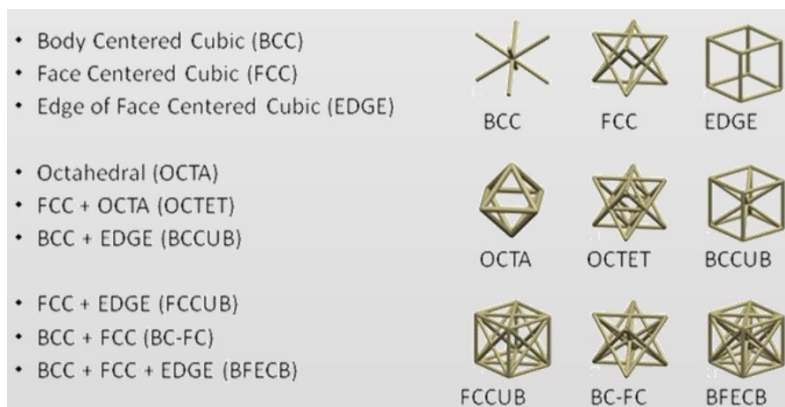
Podle (Balling a Sobieszcanski-Sobieski, 1996) dělíme MDO dle dvou hlavních přístupů – jednoúrovňový (Single-level) a víceúrovňový (Multilevel). Jednoúrovňový přístup znamená, že hodnoty návrhových proměnných určuje pouze systém optimalizace. V případě víceúrovňového přístupu jsou součástí jednotlivé disciplinární optimalizace, díky nimž se určí nezávislé návrhové proměnné každé disciplíny a systém optimalizace dále určí vazební návrhové proměnné. Uvedené přístupy můžeme dále rozdělit takto: [15]

- Single-level
  - MDF – Multiple-Discipline Feasible
  - AAO – All-At-Once Method
  - IDF – Individual-Discipline Feasible
- Multilevel
  - CSSO – Concurrent Subspace Optimization
  - BLISS – Bilevel Integrated System Synthesis
  - CO – Collaborative Optimization

## 3.6 MŘÍŽKOVÉ STRUKTURY

Použití mřížek definovaných pomocí faset je další metodou používanou ke snižování hmotnosti produktu. Získala na popularitě díky zvýšenému využití 3D tisku. Schopnost vyrábět sofistikované mřížkové struktury (Lattice Design) za pomoci tradičních výrobních procesů je prakticky nemožná. Jedná se o složité struktury, které se využívají ke snížení hmotnosti a spotřeby materiálu a současně k vyztužení vyráběných komponent.

Uživatel použije nástroje pro výběr oblasti, v níž chce mřížku generovat, poté určí vzhled a hustotu mřížky. Může vybírat z mnoha různých typů mřížkových buněk a nastavit délku okraje mřížkové buňky, šířku čáry i umístění a orientaci mřížky. Hlavní typy mřížek můžeme vidět na obr. 16 níže.



Obr. 16 Categories of cellular solids [33]

Klíčovými vlastnostmi mřížkové struktury jsou velké póry, velká plocha povrchu, relativní tuhost a schopnost absorbovat obrovské množství energie. Díky nim, a už zmíněné flexibilitě při návrhu geometrie součástí, se trámčité struktury rozšířily napříč mnoha odvětvími. Navíc lze vždy využít hned několika vlastností najednou a dosáhnout tak optimálního návrhu i u velmi náročných aplikací, jaké najdeme např. v letectví, motorsportu, kosmickém průmyslu.

Ve všech těchto odvětvích je hlavním cílem většinou snižování hmotnosti. Hmotnost má totiž přímý vliv na spotřebu paliva, ale také na výkon a množství materiálu potřebného pro výrobu. S využitím mřížkových struktur a aditivní výroby lze tuto proměnou výrazně eliminovat. Jako příklad můžeme uvést FIT West Corporation, kde pomocí SLM vyrobili hlavu motoru s vnitřní mřížkovou strukturou. Tím dosáhli 66% redukce váhy a zároveň se povedlo zvýšit plochu povrchu z 823 cm<sup>2</sup> na 6052 cm<sup>2</sup>, čímž přispěli k větší efektivitě chlazení. [34]

Na obr. 17 lze vidět využití mřížkové struktury na držáku vyrobeném pomocí aditivní technologie.



Obr. 17 Držák s mřížkovými strukturami vyrobený aditivní technologií [35]



## 3.7 SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ PRO TOPOLOGICKOU OPTIMALIZACI

### 3.7.1 ALTAIR INSPIRE

Altair Inspire, vyvinutý společností SolidThinking, je software určený pro generativní design, optimalizaci topologie a rychlé řešení simulací. Pracuje se stávajícími CAD nástroji a je navržen tak, aby vylepšil proces vývoje konceptu, zvýšil efektivitu návrhu a tuhost navrhovaných produktů. Pro tvorbu a analýzu konstrukce využívá technologie Altair OptiStruct. Geometrii modelů lze vytvářet a upravovat nástroji dostupnými přímo v prostředí Inspire. [36]

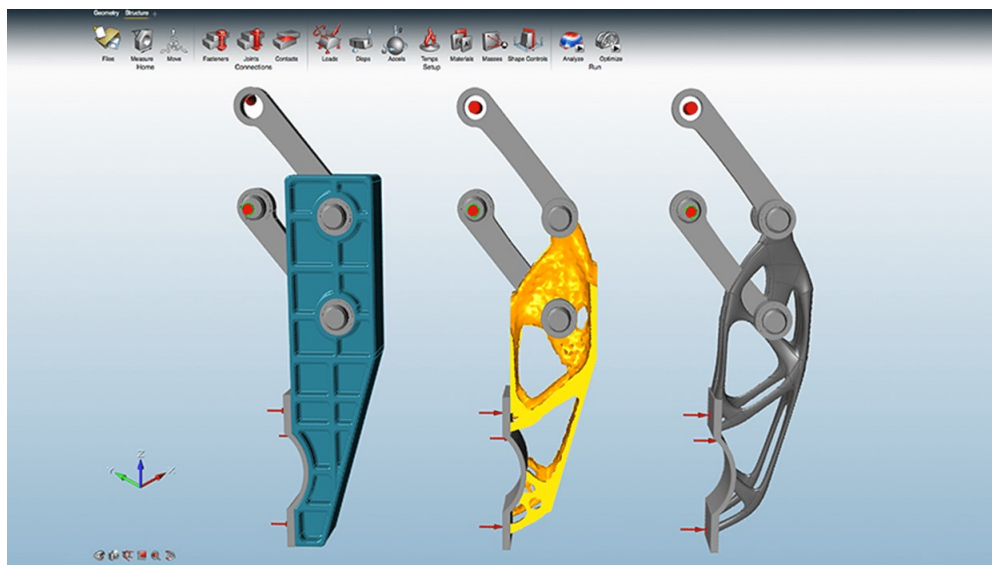
Software zvládá řešit statické lineární a normální analýzy a vyobrazit posunutí, součinitel bezpečnosti, tah, tlak a napětí ve všech bodech konstrukce. K analýze lze importovat soubory z většiny 3D CAD softwarů (Catia, Creo, Inventor, Solidworks, atd.). Export modelů probíhá ve formátu STEP, STL, IGES nebo Parasolid. [36]

#### MOŽNOSTI OPTIMALIZACE

- **Cíl optimalizace** – při optimalizaci můžeme zvolit, zda chceme maximalizovat tuhost nebo minimalizovat hmotnost konstrukce.
- **Vazby posunutí** – na model lze aplikovat omezení posunutí pomocí vazeb a omezit tak výchylky v požadovaných umístěních a směrech.
- **Silové vazby** – k omezení maximálního napětí působícího během optimalizace na model je zde globální omezení napětí.
- **Akcelerace zatížení** – nástroje pro úhlovou rychlost a zrychlení umožňují uživatelům definovat rychlost otáčení celého modelu a osu, kolem které se otáčí.
- **Gravitace** – pomocí nástroje „G-loads“ lze simulovat zatížení působící na všechny součásti konstrukce.
- **Teplotní zatížení** – umožňuje uživatelům simulovat účinky změn teploty v modelu.
- **Export do OptiStruct** – pro pokročilejší simulace může uživatel exportovat soubory do prostředí OptiStruct.

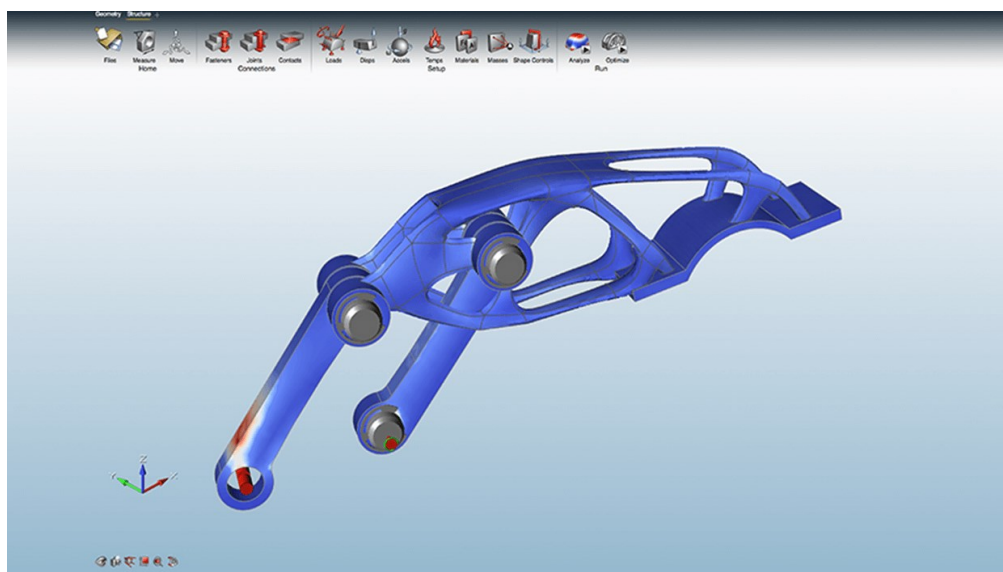
#### TVAROVÉ A VÝROBNÍ NÁSTROJE

Ovládací prvky tvaru prostředí Inspire pomáhají generovat řešení, které jsou nejen strukturálně optimální, ale také vyrobitelné. Uživatel může využít například rovin symetrie k tvorbě symetrických optimalizovaných tvarů, dále lze vytvářet cyklicky se opakující tvary jako jsou vrtule nebo kola. Jedním z dalších důležitých nástrojů je tzv. „Extrusion Shape Control.“ Tím se nastavuje konstantní průřez topologie v určitém směru. [36] Ukázku topologické optimalizace v prostředí Altair Inspire vyobrazuje obr. 18.



Obr. 18 Ukázka TO v softwaru Altair Inspire [37]

Altair Inspire je jednoduchý a intuitivní software s výbornou online podporou. Umožňuje úpravy modelu přímo v programu, ačkoliv je tato možnost někdy zbytečně složitá a je lepší importovat již předupravený model. Pro validaci návrhů je možné využít analýzu MKP (obr 16). Program také nabízí výukový program a zkušební verzi zdarma.



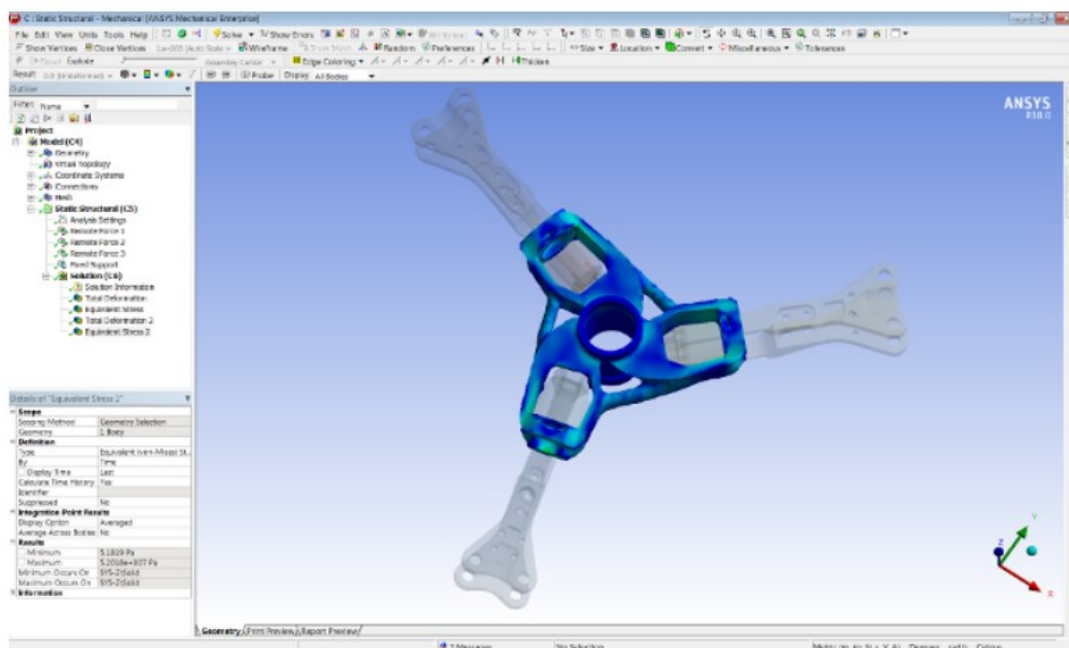
Obr. 19 MKP analýza čelisti robotické ruky [37]

### 3.7.2 ANSYS MECHANICAL

Modul topologické optimalizace nabízí také Ansys, kde je dostupný u všech licencí Ansys Mechanical a DesignSpace. Komplexnější Ansys Mechanical je vhodný pro nejčastěji požadované typy strukturálních analýz MKP. Umožňuje řešit statické analýzy včetně sestav s kontakty, lineární stabilitu, modální analýzu a stacionární i nestacionární teplotní pole. Licenční verze Enterprise navíc řeší také rychlé dynamické děje jako jsou rázy, pádové testy

nebo tváření a kombinované modely dynamiky mechanismů tuhých těles s vloženými poddajnými díly. [39]

Součástí je také pre – a postprocesor pro analýzy kompozitů a geometrický modelář. Uživatel může využívat jak grafického prostředí integrovaného do Ansys Workbench nebo použít elementové orientované prostředí Ansys Mechanical APDL. [39]

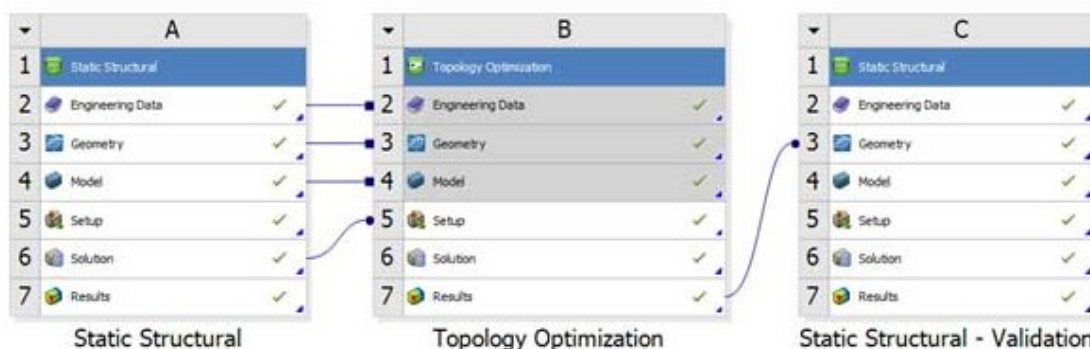


Obr. 20 Ukázka symetrie při TO v Ansys Mechanical [40]

## TYPY ANALÝZ

- Lineární a nelineární statická analýza
- Stabilita, modální analýza (vlastní frekvence)
- Odezva na buzení harmonickým zatížením, náhodné buzení
- Buzení s libovolným časovým průběhem, rychlé děje
- Dynamika rotorů (gyroskopický moment)
- Dynamika mechanismů tuhých a poddajných těles
- Stacionární a nestacionární teplotní úlohy
- Nízko a vysoko-cyklová únava, šíření trhlin
- Akustika, hydrodynamika
- Parametrická a topologická optimalizace

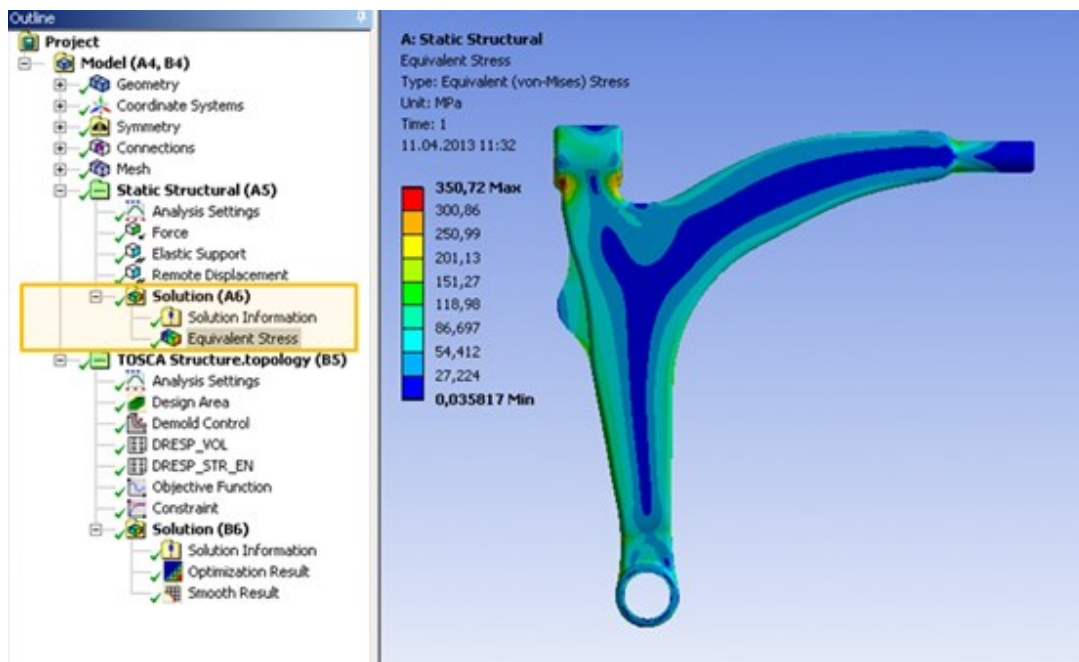
Prostředí Ansys Mechanical je přehledné, díky stromové struktuře a schématickému uspořádání projektu v prostředí Ansys Workbench (obr. 21) lze vidět stav modelu, výpočtů i výsledků. Výhodou může být i automatická generace kontaktů, široký rozsah definice okrajových podmínek a zatížení nebo uživatelsky definovaná materiálová databáze. Ansys také nabízí zkušební verze a verze pro studenty. V rámci kapitoly 4 bude popsána TO v prostředí Ansys Mechanical a uvedeny možnosti jejího nastavení.



Obr. 21 Ansys Workbench – schematické uspořádání topologické optimalizace

### 3.7.3 SIMULIA – TOSCA STRUCTURE

Program pro neparаметrickou strukturální optimalizaci, která navazuje na analýzu řešiče MKP. Plně automatická integrace je podporována řešičem Abaqus, Ansys a MSC Nastran. Základní úlohu MKP je možné připravit v libovolném FE pre-processoru, zatímco definici optimalizační úlohy je nutné provést v některém z následujících: nativní Tosca Structure GUI, Abaqus/CAE, Ansa, Ansys Workbench (Obr. 22 TOSCA Structure MKP analýza v prostředí Ansys Workbench (obr. 22)). Jednou z klíčových technologií jsou geometrické vazby, které umožňují uživateli aplikovat technologická omezení výroby (lití, lisování, kování, symetrie, těsnost, aditivní výroba atd.) na tvar součástky, a podpora nelineárních úloh a materiálů. [41]

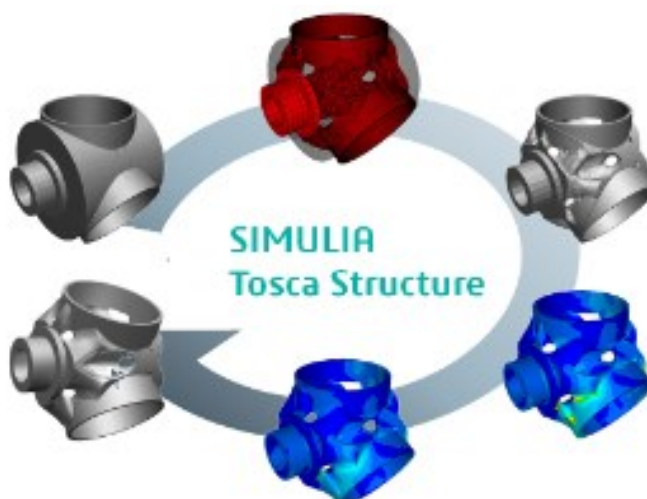


Obr. 22 TOSCA Structure MKP analýza v prostředí Ansys Workbench [41]

### MOŽNOSTI OPTIMALIZACE

Simulia TOSCA Structure, produkt společnosti Dassault systemes, je efektivní a robustní nástroj umožňující většinu druhů výše zmíněných optimalizací. Mezi jeho hlavní přednosti patří automatizovaný postprocessing optimalizovaného tvaru, snadná definice problému a přenositelnost na další úlohy nebo možnost zvolení z velké škály fyzikálních odezev, které lze definovat jako cílovou funkci či vazbovou podmínku. Na obrázku níže lze vidět celý průběh strukturální optimalizace pomocí TOSCA Structure. Poslední verze softwaru používá k TO metodu SIMP.

- Topologická optimalizace
- Optimalizace tvaru
- Rozměrová optimalizace
- Topografická optimalizace

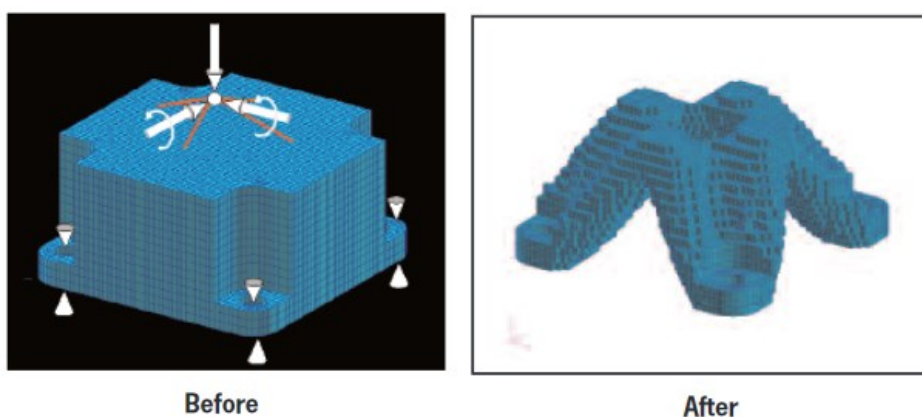


Obr. 23 Strukturální optimalizace pomocí Tosca Structure [41]

### 3.7.4 MSC NASTRAN

MSC Nastran patří mezi univerzální MKP řešiče, vhodné pro rozsáhlé analýzy. Je určen k provádění statických, dynamických a teplotních analýz. Dále umožňuje automatizovanou strukturální optimalizaci a únavovou analýzu. Byl vyvinut ve spolupráci s NASA a je produktem společnosti MSC Software. [28]

Modul MSC Nastran Topology Optimization rozšiřuje možnosti optimalizace o topologickou optimalizaci. Topologická optimalizace v programu MSC Nastran je založena na metodě hustot a jedná se o zobecněnou optimalizaci tvaru, která je blíže popsána výše. MSC Patran pak umožňuje pre – a postprocessing optimalizovaného modelu. [38]



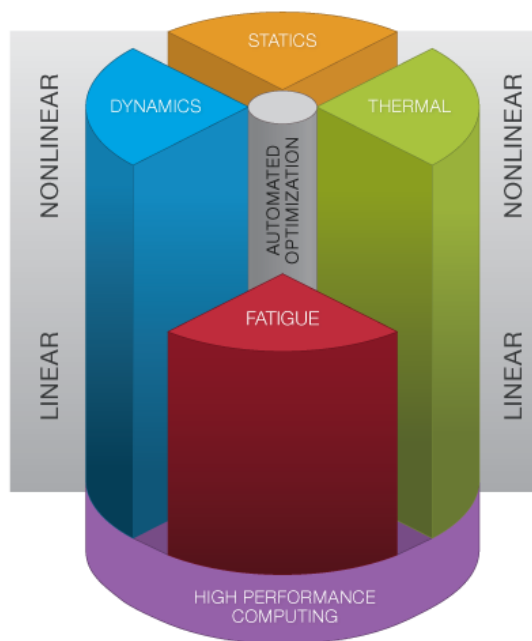
Obr. 24 TO držáku náhradního kola v prostředí MSC Nastran [38]

### MOŽNOSTI OPTIMALIZACE

Lze provádět optimalizaci tvarovou, topografickou, topologickou, dále optimalizaci maximální únavy a také životnosti. Topologická optimalizace MSC Nastran má následující vlastnosti: [38]

- 2D a 3D elementy
- Pro izotropní materiál
- Lineární i nelineární chování, vlastní frekvence, ztráta stability
- Metoda hustot (SIMP)
- Až dva miliony návrhových proměnných a omezujících podmínek
- Filtrační techniky pro „černobílé“ rozložení materiálu
- Nastavení minimální velikosti členu pro zachování výrobitelnosti

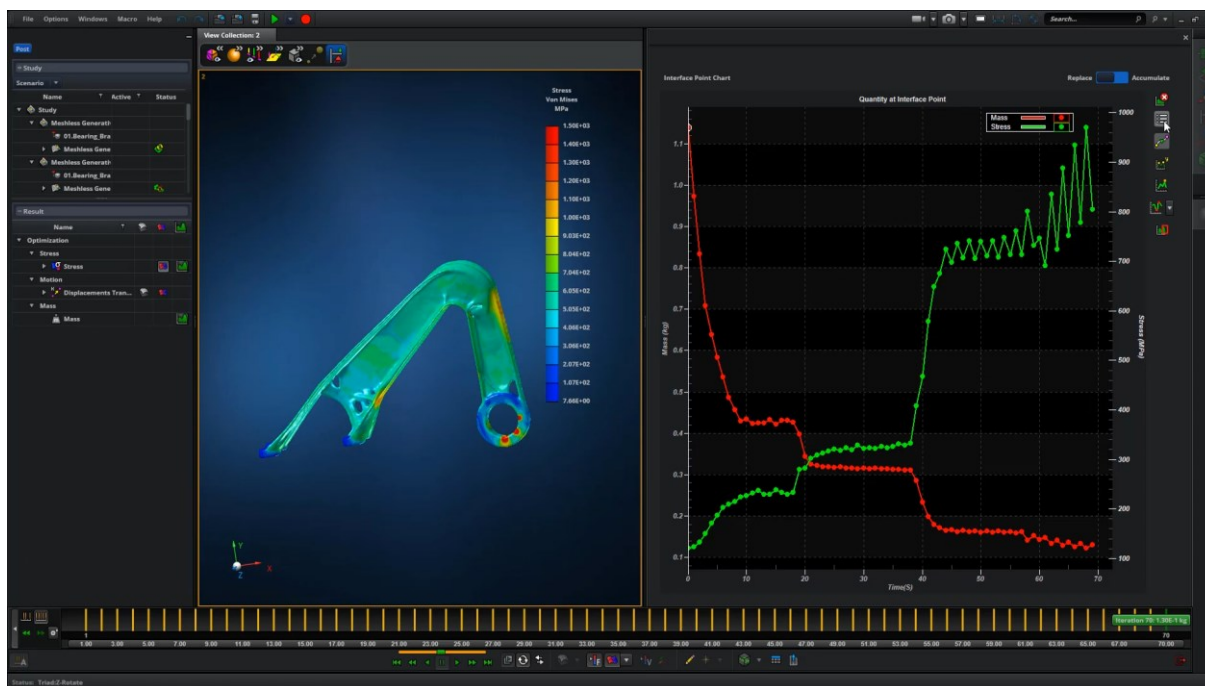




Obr. 25 Multidisciplinární Strukturální Analýza MSC Nastran [38]

### 3.7.5 MSC APEX GENERATIVE DESIGN

MSC Apex Generative Design je dalším produktem společnosti MSC, který je ovšem primárně zaměřený na optimalizaci topologie. Software byl původně vyvinut pod názvem AMendate vědci z Univerzity v Paderbornu, později se stal součástí společnosti MSC. Využívá uživatelské prostředí programu MSC Apex.



Obr. 26 TO v MSC Apex Generative Design [42]

Na rozdíl od výše zmiňovaných softwarových řešení nepracuje s metodou SIMP, ale s tzv. hard-kill algoritmem. Ten při optimalizaci zanedbává elementy konstrukce, na které působí nízké napětí a buď se s nimi nepočítá v dalších iteracích nebo jsou vymazány úplně. Tento druh algoritmu umožňuje návrh viditelně odlišných tvarů konstrukcí. Řešení TO v programu MSC Apex Generative Design bude předmětem kapitoly 4, kde budou detailněji představeny také možnosti nastavení TO v tomto softwaru a porovnány s tradičnějším prostředím Ansys Mechanical. [42]

## MOŽNOSTI OPTIMALIZACE

MSC Apex Generative design přichází s novým typem optimalizace, kdy se stává uživatelsky přívětivější, především díky zautomatizování celého procesu. Software dokáže automaticky generovat síť a po optimalizaci vytvořit již hotový CAD model a vytváří simultánně více návrhových řešení (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**)

- Možnost zadávat maximální napětí jako cíl optimalizace
- Automatické generování sítě
- Inteligentní vyhlazování povrchu modelu
- Optimalizace mřížkových struktur
- Optimalizace pro aditivní výrobu

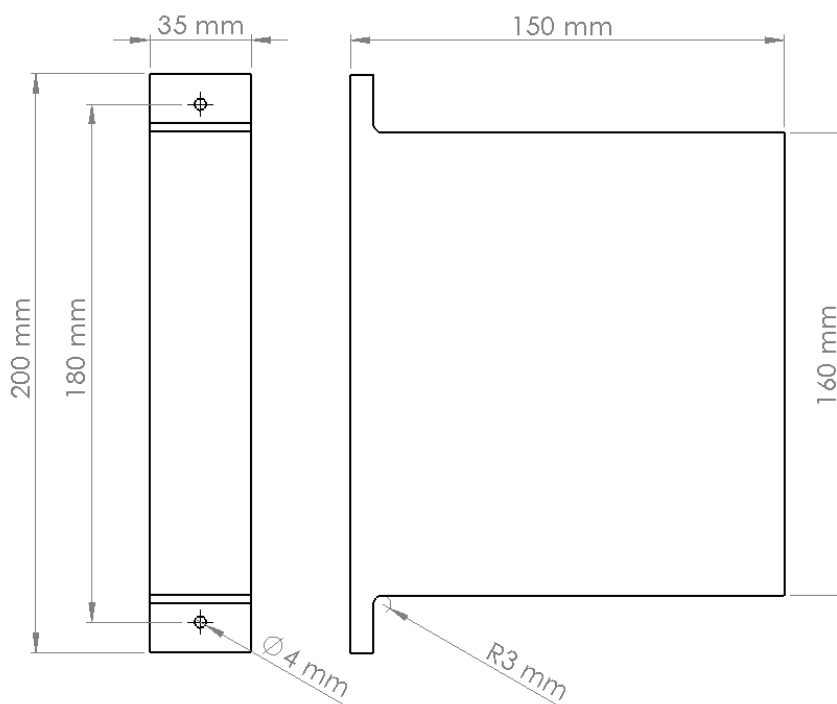


## 4 DIMENZOVÁNÍ SOUČÁSTÍ POMOCÍ TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE

V této kapitole bude demonstrováno provedení topologické optimalizace v softwarech Ansys Mechanical a MSC Apex Generative Design. V kapitole budou rozebrány možnosti nastavení topologické optimalizace v obou softwarech a popsány uživatelské rozdíly při jejich využití. Protože oba softwary využívají při optimalizaci jinou metodu výpočtu, výstupy budou porovnány jak po technické, tak vizuální stránce.

### 4.1 TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE KONZOLE POLIČKY

Pro příkladné provedení topologické optimalizace byla vybrána konzola poličky, která poslouží k demonstraci daných vlastností topologické optimalizace obou programů. Tato práce je rešeršního charakteru, zatížení bylo tudíž zvoleno pouze orientačně. Uvažujeme tedy, že na konzoli působí tlak 18,7 kN, což odpovídá zatížení poličky 20 kg. Rozměry základního modelu můžeme vidět na obr. 27.



Obr. 27 Rozměry základního modelu

Navrhovaná konzole bude optimalizována pro potřeby 3D tisku. Jako materiál bylo zvoleno vlákno PLA pro svou univerzálnost, dobré mechanické vlastnosti a relativně bezproblémový proces 3D tisku oproti např. ABS, u kterého by se při tisku tvarů navržených topologickou optimalizací výrazněji projevil vliv teplotní roztažnosti. Další výhodou materiálu PLA pro tuto aplikaci je fakt, že se dobře lakuje.

Tab. 4 Mechanické vlastnosti materiálu PLA

Mechanické vlastnosti materiálu PLA	
$\rho$	1250 kg/m <sup>3</sup>
$E_0$	2340 MPa
$\nu$	0,3
$R_e$	40 MPa
$R_m$	64,5 MPa

#### 4.1.1 NASTAVENÍ V ANSYS MECHANICAL

##### STRUKTURÁLNÍ ANALÝZA

Jelikož topologická optimalizace Ansys Mechanical vychází z výsledků strukturální analýzy, provádí se tento krok jako první. Strukturální analýza zkoumá mechanické parametry zatěžovaného objektu, jakými jsou například globální či lokální napětí v modelu nebo posuny jednotlivých bodů konstrukce. Tyto hodnoty pak mohou sloužit při nastavení vedlejších podmínek topologické optimalizace. Je nutno dodat že topologická optimalizace dokáže pracovat také s daty získanými pomocí modální analýzy. Díky takovým vstupům lze modul optimalizovat vlastní frekvence konstrukce. Pro návrh konzole poličky však nebyla tato analýza provedena.

Dalším krokem je import geometrie modelu do projektu v prostředí Workbench. Ta může být importována ve formátu STEP nebo Parasolid. Ansys také umožňuje tvorbu vlastní geometrie v podprogramu SpaceClaim, který slouží i pro úpravu importované geometrie.

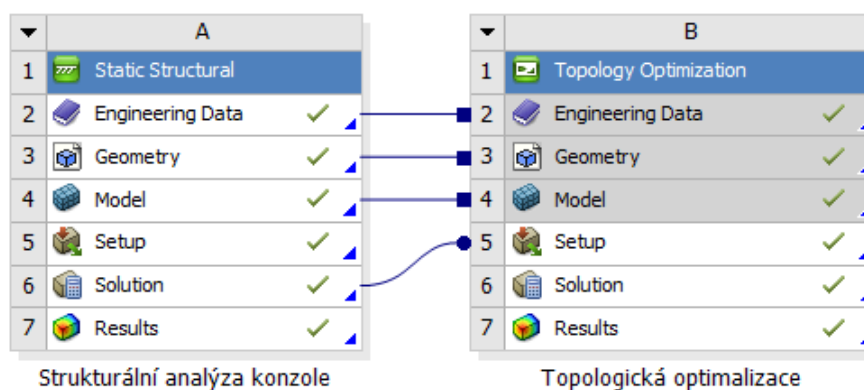
V modulu „Engineering Data“ se poté do projektu přidají materiály, které jsou použity v konstrukci. Ansys nabízí knihovnu již definovaných materiálů. Lze však definovat i vlastní materiál. Materiál PLA je třeba definovat parametry uvedenými v tab. 4. Materiály dále přiřadíme jednotlivým částem konstrukce v podprogramu Mechanical v sekci „Model“.

Následuje tvorba sítě (Mesh). Ta by měla být dostatečně jemná, jemnost sítě do jisté míry ovlivňuje přesnost výsledků strukturální analýzy a následnou topologickou optimalizaci. Vždy je však potřeba brát v úvahu výpočtovou náročnost úlohy. Platí čím jemnější síť, tím náročnější a delší výpočet, nikoliv však přesnější, protože od určité velikosti se již přesnost výpočtů nemění. Pro případ konzoly byla zvolena síť o velikosti 2 mm a lineárním typem prvků, které jsou sice méně přesné, nicméně jsou méně náročné na výpočet. Proto se pro potřeby topologické optimalizace využívají častěji než prvky kvadratické. V nastavení „Mesh“ lze ke kontrole prvků sítě využít graf „Skewness“.

Poté, co je síť hotová, se k modelu přidají vnější podmínky. Konzole byla zatížena tlakem již zmíněné velikosti 18,7 kN a dále byly přidány dvě pevné vazby (Fixed Support) nahrazující šroubová spojení. Takto byl model připravený k provedení strukturální analýzy.

## NASTAVENÍ MODULU TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE

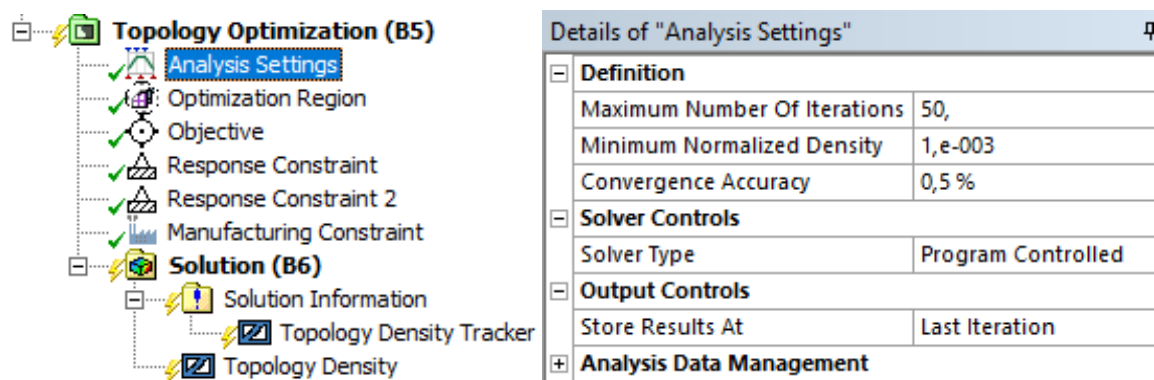
Napojení modulu topologické optimalizace na výsledky strukturální analýzy se provádí v projektovém okně prostředí Workbench. Propojením obou modulů dle obr. 28 dojde k nasdílení dat modulu pro topologickou optimalizaci. Nabídka topologické optimalizace se poté rovněž zobrazí v prostředí Mechanical, odkud se provádí další nastavení.



Obr. 28 Zapojení modulu topologické optimalizace

## NASTAVENÍ ANALÝZY

V sekci „Analysis Settings“ je možné měnit základní parametry procesu optimalizace jako je maximální počet iterací, přesnost konvergence nebo možnosti ukládání výsledků. Pro rychlejší výpočet a zamezení cyklení výpočtu byl pro optimalizaci konzole zvolen maximální počet iterací na padesát. Přesnost konvergence pak na 0,5 % a pro uložení byla zvolena možnost poslední iterace, přednastavena je však možnost ukládání všech iterací.

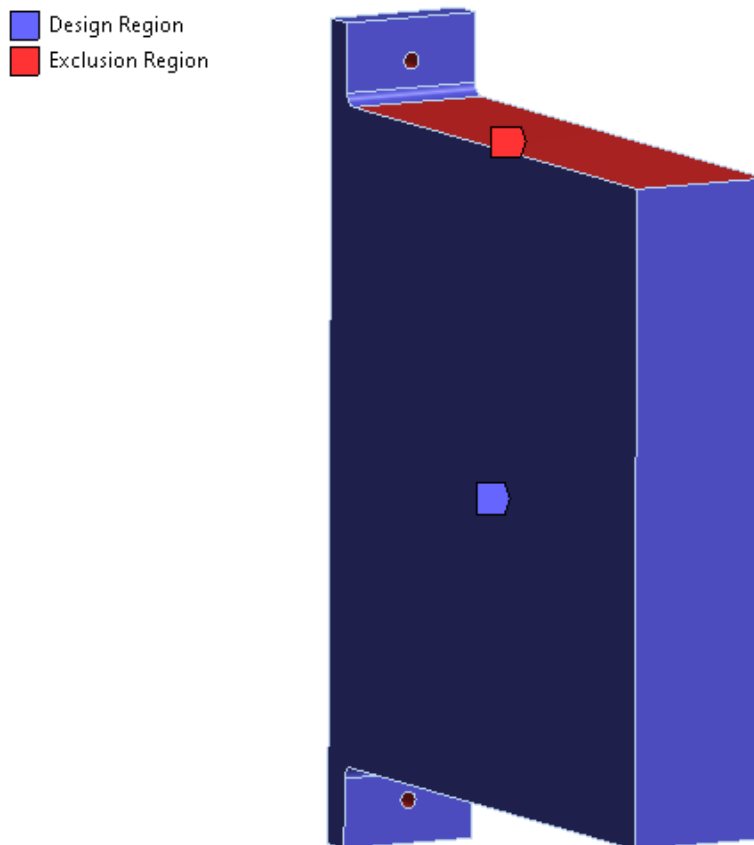


Obr. 29 Analysis Settings – nastavení základních parametrů TO v Ansys Mechanical

## OBLAST OPTIMALIZACE

Dalším důležitým bodem je nastavení návrhového prostoru, se kterým má optimalizace pracovat. Děje se tak skrz sekci „Optimization Region“. V případě konzoly byla za návrhovou oblast zvolena celá importovaná geometrie modelu, s výjimkou kontaktních ploch a plochy zatížené tlakovou silou, tak jak lze vidět na obr. 30. Tyto okrajové podmínky byly vybrány

automaticky pomocí funkce „Boundary Condition“ v části „Exclusion Region“. Tyto části geometrie byly z optimalizace vyřazeny z důvodu zachování ploch důležitých pro montáž. Dalšími možnostmi definice okrajových podmínek v prostředí Mechanical je funkce „Named Selection“ a manuální volba geometrie. Takto byla zvolena návrhová oblast.



Obr. 30 Optimization Region – zadání návrhového prostoru TO v Ansys Mechanical

## CÍL OPTIMALIZACE

V sekci „Objective“ byl zvolen cíl optimalizace „Minimize Compliance“, což znamená optimalizaci s cílem maximální tuhosti konstrukce. Na obr. 31 můžeme vidět nabídku dalších dvou možností. Jedná se o minimalizaci váhy a objemu. Přidáním dalšího řádku lze zadat i více cílů najednou a dokonce jim přiřadit různou váhu. Omezení hmotnosti optimalizovaného modelu však lze zadat i jako vedlejší podmínku v „Response Constraint“. Tuto vedlejší podmínku však nelze zadat současně s cílem minimalizace váhy v sekci „Objective“.

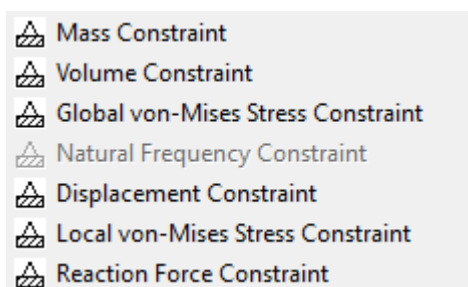
Enabled	Response Type	Goal	Formulation	Environment Name	Weight	Multiple Sets	Start Step	End Step
<input checked="" type="checkbox"/>	Compliance	Minimize	Program Controlled	Static Structural	1	Enabled	1	1
	Compliance							
	Mass							
	Volume							

Obr. 31 Objective – volba cíle TO a návrhové odezvy v Ansys Mechanical

### VEDLEJŠÍ PODMÍNKY

Jako vedlejší podmínka byla zvolena výše zmíněná podmínka omezení hmotnosti. Hodnota této podmínky byla nastavena na 10 % původní hmotnosti. Druhou omezující podmínkou při optimalizaci byla podmínka ekvivalentního napětí (von Mises Stress), kde byla zvolena hodnota poloviny meze kluzu zvoleného materiálu (20 MPa).

V prostředí Mechanical je možné zvolit i další vedlejší podmínky (viz obr. 32). V případě optimalizace konzoly zde nebyla dostupná možnost „Natural Frequency Response“, protože nebyla připojena modální analýza modelu.

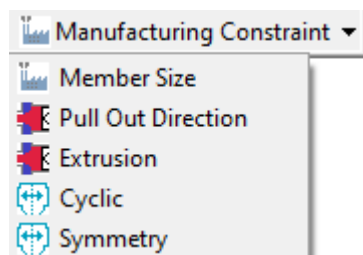


Obr. 32 Response Constraint – výčet možných vedlejších podmínek v Ansys Mechanical

### VÝROBNÍ OMEZENÍ

Často využívané jsou „Manufacturing Constraints“. Díky těmto omezením, můžeme optimalizaci přizpůsobit některým výrobním operacím. Jednou z nich je možnost nastavení maximální nebo minimální velikosti elementů, která se často používá jak při optimalizaci pro výrobu aditivní technologií, tak i u dalších výrobních metod. Protože se předpokládal tisk konzole technologií FDM za použití trysky o průměru 0,4 mm, byla zvolena minimální velikost elementu 0,5 mm.

Dále byla nastavena podmínka symetrie podle roviny  $xy$  nově zvoleného systému souřadnic (Symetric). Existují zde i možnosti vytažení v určitém směru (Pull Out Direction), omezení umožňující výrobu tažením (Extrusion) a také podmínka cyklování (Cyclic) pro optimalizaci modelů využívající kruhové symetrie. Všechny výrobní omezení je k optimalizaci potřeba přidat přes hlavní panel modulu Mechanical.



Obr. 33 Manufacturing constraint – výčet možných výrobních omezení v Ansys Mechanical

#### 4.1.2 NASTAVENÍ V MSC APEX GENERATIVE DESIGN

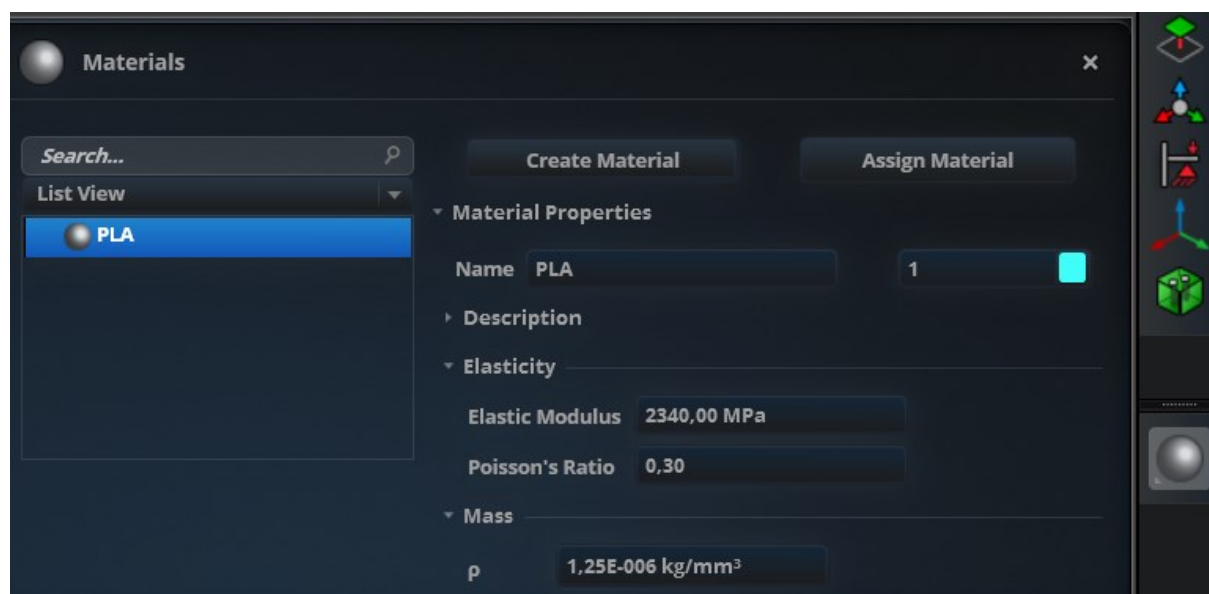
Jak již bylo zmíněno, topologická optimalizace programu MSC Apex Generative Design, nevyužívá na rozdíl od ostatních zmiňovaných softwarů metodu SIMP, ale přichází s novým přístupem v podobě „hard-kill“ algoritmu. [42] Rozdíly však najdeme také v uživatelském nastavení topologické optimalizace.

#### STRUKTURÁLNÍ ANALÝZA

Hned prvním rozdílem je absence provádění strukturální analýzy. Lépe řečeno, analýzu nezadáva uživatel před samotnou optimalizací, jako tomu je v prostředí Ansys Mechanical, ale program ji provádí automaticky a hodnoty posunů a napětí přepočítává v průběhu optimalizace. Automaticky je tvořena také síť konečných prvků, která je skryta před uživatelem, a k jejíž tvorbě software využívá metodu „Adaptivity meshing“. Díky tomu se každou další iterací zlepšuje také kvalita síť.

#### MATERIÁL A GEOMETRIE

Na začátku je ovšem třeba importovat geometrii modelu, který chceme optimalizovat a modelu přiřadit materiál. Importovat lze jakýkoli z formátů „Multifiles“. Před dokončením musíme zvolit jednotky importované geometrie. Pro případnou úpravu geometrie modelu slouží nástroje v okně „Geometry Edit Tools“. Pokud nemáme uložený žádný materiál, zvolíme možnost „Create Material“ v okně „Materials“. Pro materiál PLA jsme zvolili hodnoty dle tab. 4, tak jak lze vidět na obrázku níže.



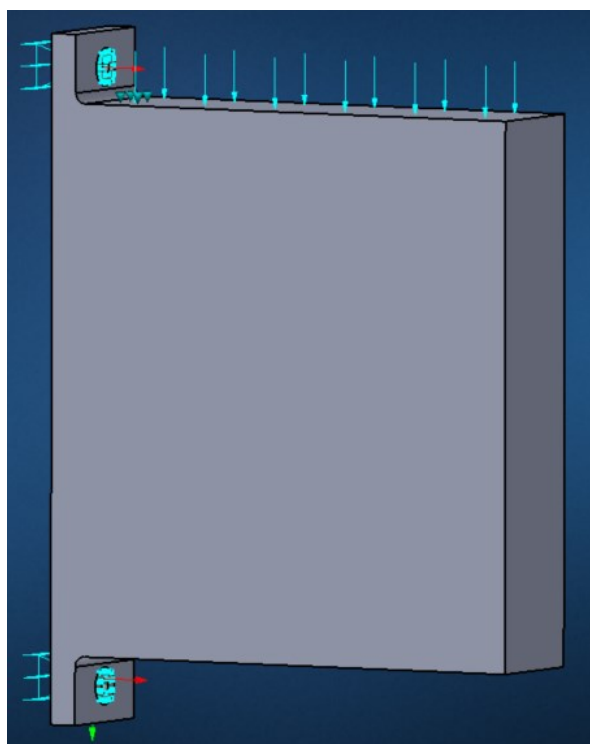
Obr. 34 Volba materiálu a jeho vlastností podstatných pro TO v MSC Apex GD

## OBLAST OPTIMALIZACE

Poté byly z optimalizace vyloučeny, podobně jako v Ansys Mechanical, důležité oblasti geometrie. Oblasti byly vybrány metodou odsazení, kde byla vybrána vzdálenost 3,5 mm. Jak lze vidět na následujícím obrázku, tato metoda odřízne část původní geometrie ve zvolené vzdálenosti od vybrané plochy a vytvoří samostatnou část modelu, která není součástí optimalizace. V nabídce je rovněž možnost manuálního zvolení vyloučených ploch, stejně jako v Ansys Mechanical.



Obr. 35 Non-Design Space – definice návrhového prostoru TO v MSC Apex GD



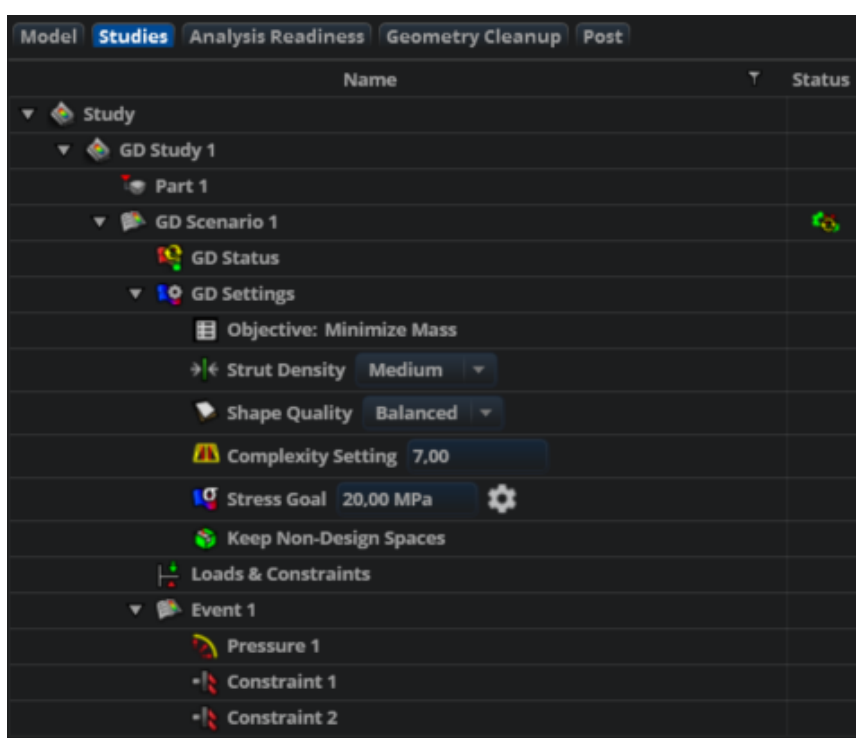
Obr. 36 Okrajové podmínky – zadání zatížení a vazeb modelu v MSC Apex GD

## OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Následně byly sekci „Loads and Boundary Condition“ definovány vazby tělesa a také typ a velikost zatížení. Byl zde zachován stejný typ vazeb i zatížení, jako v optimalizaci v Ansys Mechanical.

## NASTAVENÍ OPTIMALIZACE

Po nastavení výše uvedených parametrů umístíme naši geometrii do „Analysis Scene“, přejdeme do části „Studies“, kde necháme vytvořit studii a přiřadíme k ní zvolenou součást. Na následujícím obrázku lze vidět stromovou strukturu studie a zadaný scénář optimalizace konzoly.



Obr. 37 Studies – okno pro nastavení scénářů a parametrů TO v MSC Apex GD

Nejdůležitějšími parametry optimalizace jsou:

- Hustota rozložení podpěr (Strut Density),
- Kvalita optimalizovaného tvaru (Shape Quality),
- Složitost geometrie (Complexity Setting)
- Cílové napětí (Stress Goal)

Obě hodnoty, hustota rozložení i kvalita povrchu byly při optimalizaci nastaveny na střední hodnotu. Obě sice významně ovlivní výslednou geometrii, hrají však velkou roli také v délce a náročnosti výpočtu. Možnost „Sparse“ se volí například kvůli potřebě místa pro výrobní nástroje nebo pro málo zatížené konstrukce. „Dense“ se používá v opačných případech.



Optimalizace umožňuje nastavení složitosti geometrie ve smyslu robustnosti konstrukce. Při nižších hodnotách při optimalizaci vzniknou spíše jednotné tvary bez velkých prohlubní a tenkých stěn. Čím vyšší hodnota „Complexity“, tím vznikne složitější, ale na pohled křehčí tvar. Tento parametr rovněž ovlivňuje náročnost výpočtu a software před zahájením optimalizace ověří, zda zvolená hodnota není příliš vysoká. Z tohoto důvodu proběhla optimalizace na stupni složitosti 8.

Při optimalizaci bylo cílové napětí nastaveno na polovinu meze kluzu materiálu PLA (20 MPa). Jelikož cíl optimalizace („Objective“) je minimalizace hmotnosti. Předpokládá se, že hodnota napětí po optimalizaci se bude blížit této hodnotě.

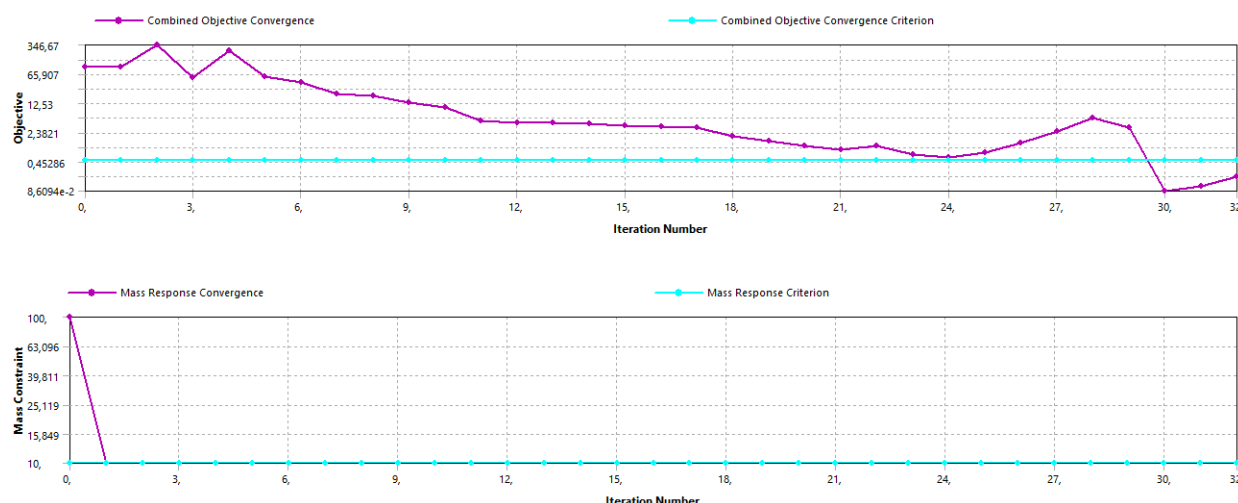
## 4.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE

### 4.2.1 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ V ANSYS MECHANICAL

Jakmile je vše nastaveno, spustí se samotná topologická optimalizace, ta může, v závislosti na zadáných parametrech výpočtu a komplexnosti geometrie, trvat několik minut až v řádu hodin.

Výsledky můžeme sledovat již v průběhu optimalizace. Pokud je zvolena možnost ukládání všech iterací, pak můžeme v sekci „Topology Density Tracker“ sledovat výsledky jednotlivých iterací topologické optimalizace.

Další informace o výsledcích nám poskytuje záložka „Worksheet“ v sekci „Solution Information“, kde najdeme grafy konvergence cíle optimalizace a konvergence vedlejších podmínek. Z každého grafu je patrné, nakolik se řešení jednotlivých iterací optimalizace blíží zadaným hodnotám.



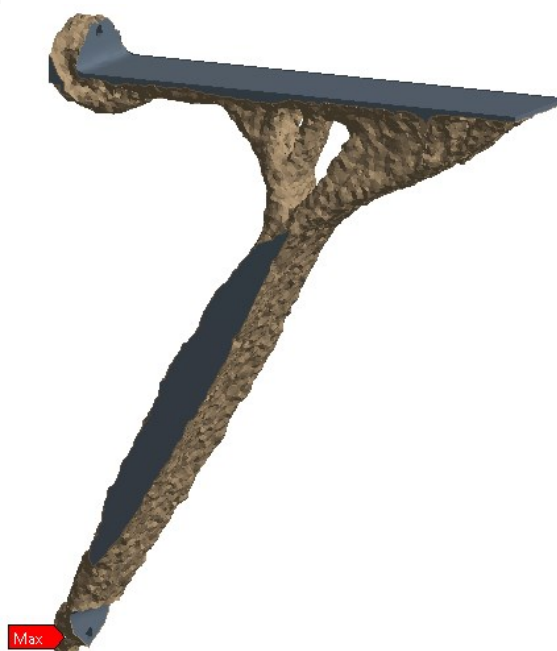
Obr. 38 Grafy konvergence v Ansys Mechanical

Z grafu provedené optimalizace (obr. 38) je patrné, že zatímco vedlejší podmínka o zachování hmotnosti byla splněna téměř okamžitě, hlavní cíl optimalizace konvergoval postupně a je jen na uživateli, jaké hodnoty bude považovat za uspokojivé. Naše řešení poslední iterace

vyhovuje námi zadaným podmínkám. V průběhu optimalizace se však může stát, že hodnoty konvergovat nebudou, v takovém případě je vhodné optimalizaci přerušit a přehodnotit nastavení topologické optimalizace.

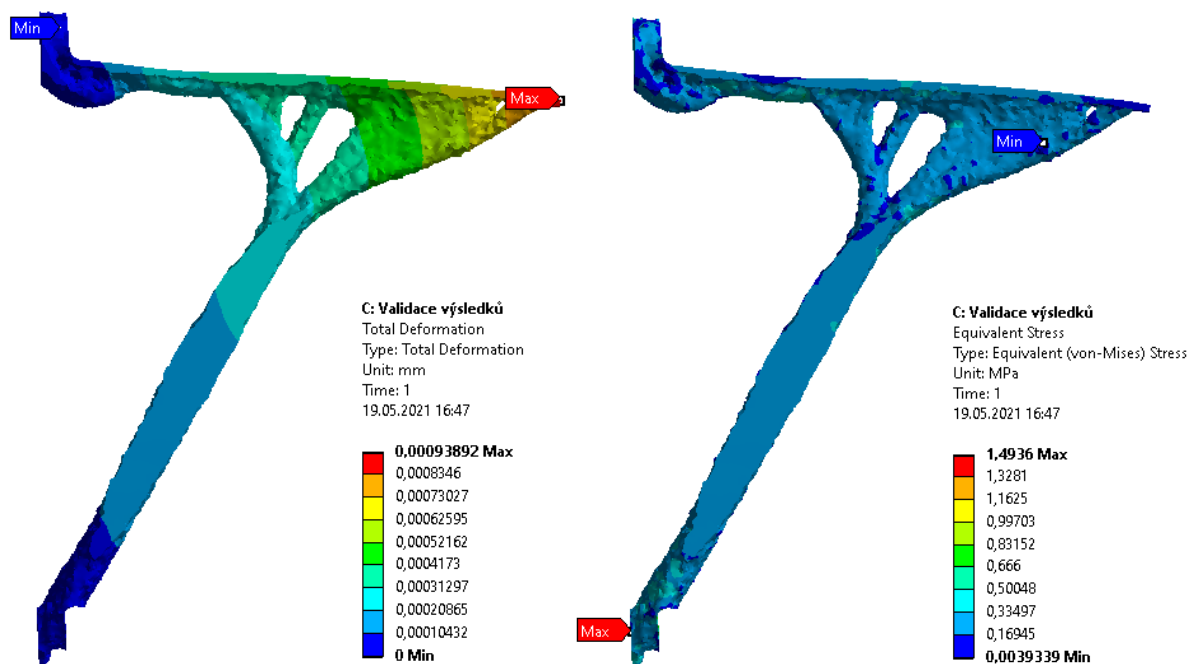
Detaily o konečném výsledku topologické optimalizace nalezneme v sekci „Topology Density“. Zobrazená tabulka (obr. 39) obsahuje informace o počáteční a optimalizované geometrii, počtu iterací nebo funkci „Retained Threshold“, díky které můžeme dodatečně přidat nebo odebrat materiál. Z tabulky je jasné, že zadané podmínky byly splněny. Také zde vidíme optimalizovanou geometrii, která je spojitá, můžeme tedy přistoupit k validaci výsledků. Mírné vady geometrie je možné dále upravit v podprogramu SpaceClaim. Výstupem TO programu Ansys je geometrie složená z plošek. Výsledek je tedy možné ihned exportovat ve formátu stl, abychom však ověřili, zda byly splněny naše požadavky, musíme model převést na pevné těleso a výsledky ověřit pomocí strukturální analýzy. Díky tomu dokážeme zhodnotit řešení topologické optimalizace.

Details of "Topology Density"	
Scope	
Scoping Method	Optimization Region
Optimization Region	Optimization Region
Definition	
Type	Topology Density
By	Iteration
Iteration	Last
<input type="checkbox"/> Retained Threshold	0,5
Exclusions Participation	Yes
Suppressed	No
Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	1,e-003
<input type="checkbox"/> Maximum	1,
<input type="checkbox"/> Original Volume	8,5119e+005 mm <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Final Volume	91785 mm <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Percent Volume of Original	10,783
<input type="checkbox"/> Original Mass	1,064 kg
<input type="checkbox"/> Final Mass	0,11473 kg
<input type="checkbox"/> Percent Mass of Original	10,783
Visibility	
Show Optimized Region	Retained Region
Information	
Iteration Number	32



Obr. 39 Topology Density – data TO (tabulka výsledků a výsledná geometrie) z Ansys Mechanical

Přes nabídku výsledků topologické optimalizace v projektovém okně vytvoříme validační systém v podobě nové strukturální analýzy. Vstupem této analýzy budou výsledky topologické optimalizace. Poté co jsme zkontrolovali a opravili geometrii, pokračujeme opětovným nastavením strukturální analýzy nebo v případě validace v jiném softwaru exportujeme model z programu SpaceClaim například ve formátu parasolid. Při úpravě geometrie je důležité, aby zůstaly zachovány funkční plochy, jinak by došlo ke zkreslení výsledků strukturální analýzy. Pro validaci výsledků optimalizované poličkové konzoly byla nejprve zjemněna síť facet a vzápětí byla facetová geometrie převedena na pevnou. Následně byla provedena validace výsledků.



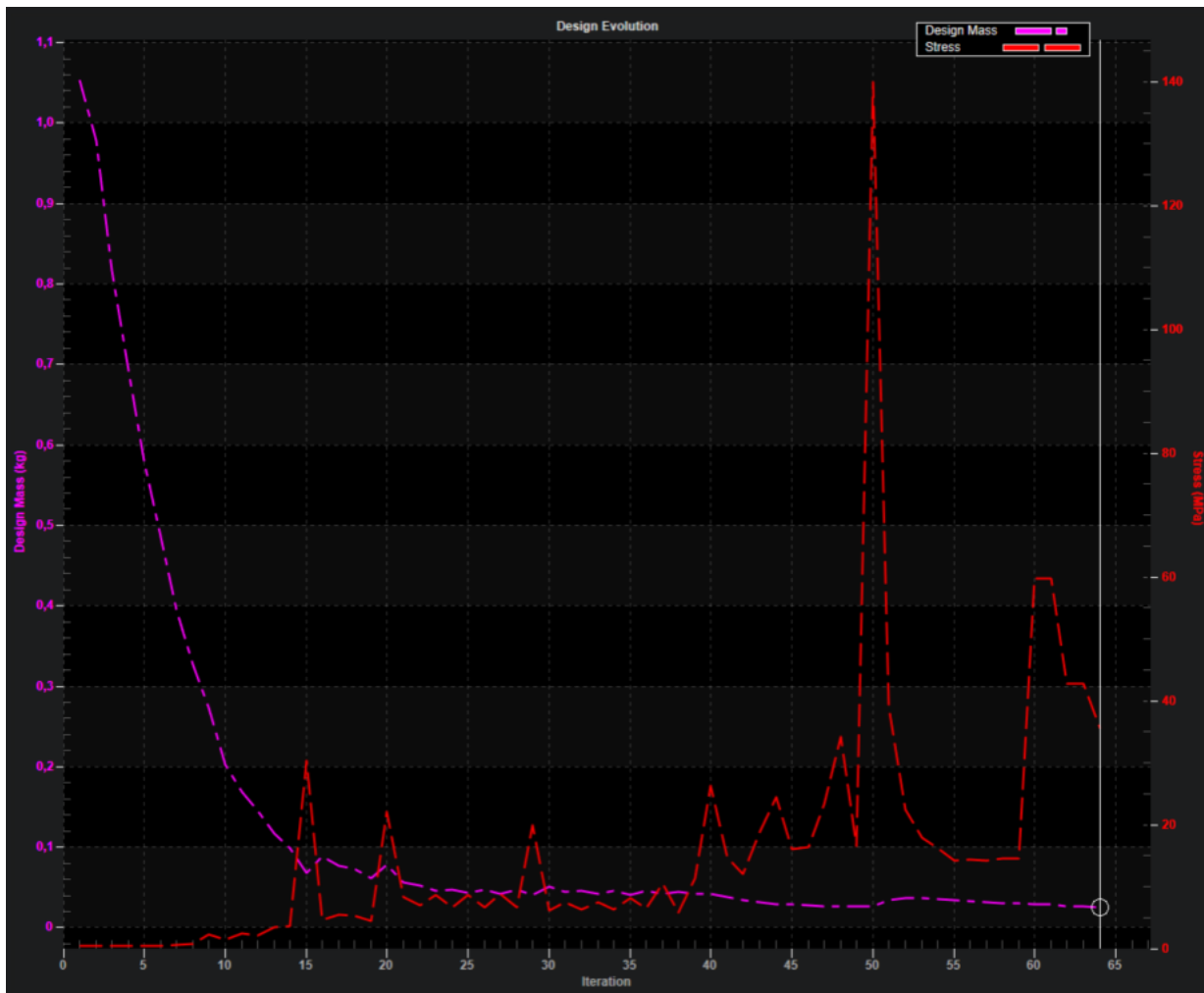
Obr. 40 Validace výsledků – vykreslení posutí a lokálního napětí optimalizovaného modelu při strukturální analýze v Ansys Mechanical

#### 4.2.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ V MSC APEX GENERATIVE DESIGN

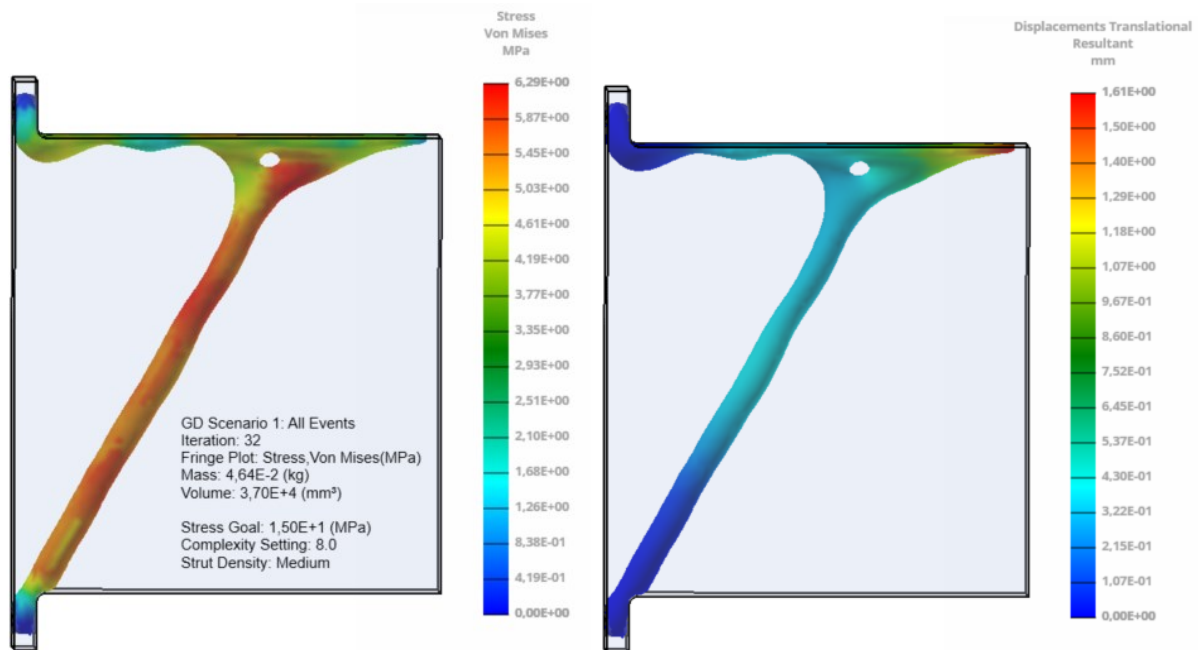
Po spuštění topologické optimalizace v MSC Apex Generative Design, přejdeme do sekce „Post-Process, kde můžeme průběžně kontrolovat stav výsledků jednotlivých iterací, které jsou k dispozici už průběhu optimalizace a můžeme je ihned exportovat ve formátu stl. Obdobně jako v prostředí Mechanical, je zde možnost využít graf s daty o probíhající optimalizaci (Generative Design Chart), kde můžeme sledovat, jestli se parametry blíží požadovaným hodnotám. V možnostech zde jsou grafy následujících parametrů:

- Hodnoty napětí
- Hodnoty posunutí
- Hmotnost modelu
- Objem modelu
- Kritérium selhání
- Index dosažení cíle optimalizace

Z grafu na obr. 41 je zřejmé, že při více než polovině iterací byla splněna podmínka maximální hodnoty napětí. Většina hodnot se pohybovala kolem 10 MPa. Na základě grafu byl vybrán výsledek iterace 32, který je znázorněn na obr. 42, kde je také porovnán s tvarem základního modelu.



Obr. 41 Generative Design Chart



Obr. 42 Výsledná geometrie po TO MSC Apex GD v porovnání se základním modelem

### 4.2.3 VÝSLEDKY A DISKUSE

V tab. 5 jsou shrnuty výsledky obou provedených topologických optimalizací. V případě optimalizace provedené v Ansys Mechanical bylo dosaženo zvýšení tuhosti a zároveň byla splněna vedlejší podmínka maximálního zůstatku hmoty 10 %. Dále byla zachována zadaná podmínka symetrie modelu.

Optimalizace v MSC Apex Generative Design měla za cíl minimalizovat hmotnost modelu tak, aby maximální napětí nepřesáhlo hodnotu 20 MPa. Tato podmínka byla splněna s bezpečností 3,2. Jelikož obě optimalizace proběhly úspěšně, získané geometrie je možné exportovat k tisku.

*Tab. 5 Porovnání výsledků TO*

Návrh	Váha [kg]	Max. napětí [MPa]	Posun [mm]	Objective
Základní	1,064	1,599	0,017	-
Ansys Mechanical	0,115	1,494	0,001	Minimize compliance
MSC Apex GD	0,046	6,290	1,680	Minimize mass

Software MSC Apex Generative Design je uživatelsky velmi přívětivé a nenáročné řešení. Nastavení topologické optimalizace je zde velmi rychlé, hlavně díky automatické tvorbě sítě, což usnadňuje práci a také se eliminují nepřesnosti výpočtu zaviněné uživatelem. Další výhodou tohoto softwaru je velmi dobrá kvalita optimalizovaného povrchu, která usnadňuje další práci s modelem.

Ansys Mechanical na druhou stranu disponuje větším množstvím funkcí, ať už při přípravě geometrie, samotném nastavení topologické optimalizace nebo následném post-processingu (při nastavení optimalizace v programu od MSC chybí například vedlejší podmínka symetrie konstrukce). Uživatel tak má lepší kontrolu nad průběhem optimalizace. Nastavení je však pracnější, výpočet časově náročnější, jelikož proces optimalizace není tak automatizovaný, jako v případě MSC Nastran Generative Design.

## ZÁVĚR

V první části bakalářské práce byl popsán historický vývoj konstruování, techniky a metodologie navrhování strojů. Dále zde byly srovnány metody efektivního návrhu z hlediska přístupu k technickému problému. Následuje porovnání klasického procesu vývoje výrobku s procesem využívajícím moderní optimalizační metody.

Druhá kapitola je zaměřena na řešení moderních metod návrhu nosných konstrukcí. V této části jsou rozebrány metody strukturální optimalizace, je zde vysvětlena podstata daných metod. Detailněji se kapitola zabývá topologickou optimalizací, přístupy a procesem topologické optimalizace. Poslední část kapitoly obsahuje výčet softwarových řešení, které se topologickou optimalizací zabývají.

Cílem poslední kapitoly bylo dimenzování součástí s využitím moderních metod návrhu. Přesněji s využitím topologické optimalizace. Tato optimalizace byla provedena ve dvou různých softwarech. V Ansysu Mechanical, jenž pro topologickou optimalizaci využívá metodu SIMP a v MSC Apex Generative Design, který využívá novější typ výpočtu. Práce s těmito softwary byla v této části práce znázorněna na příkladu topologické optimalizace konzoly políčky, přičemž v případě Ansysu se jednalo o optimalizaci na maximální tuhost modelu, zatímco optimalizace v softwaru MSC Apex Generative Design měla za cíl minimalizovat hmotnost konzoly. Relevanci dosažených výsledků prokázala kontrolní strukturální analýza. V kapitole jsou popsány možnosti nastavení topologické optimalizace v obou programech, s důrazem na uživatelské rozdíly. Ty jsou spolu s výsledky obou optimalizací diskutovány také v závěru kapitoly.

Předpokládá se, že v budoucnu dojde k dalším inovacím návrhových metod a současně automatizaci celého návrhového procesu. Při dalším vývoji softwarových řešení bude jistě také kladen důraz na možnosti nastavení vedlejších podmínek a výrobních omezení. Možné zastoupení úlohy konstruktéra, ovšem nebude tak jednoduché, zejména kvůli rozhodovacím schopnostem. Ty budou možná částečně nahrazeny prvky umělé inteligence, které by šlo do procesu zakomponovat.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] SHIGLEY, J. E., Ch. R. MISCHKE, R. G. BUDYNAS, M. HARTL a M. VLK. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V Brně: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [2] ČSN EN ISO 9000 (010300). *Systémy managementu kvality - Základní principy a slovník*. Praha: Český normalizační institut, 2016.
- [3] HOSNEDL, S. *Obecné strojní části 1: teoretické základy, spoje, přenosové části, otočná uložení, akumulátory energie, hřídelové spojky*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. ISBN 978-80-261-0125-3.
- [4] *E-konstrukér: Portál pro strojní konstruktéry* [online]. 2014 [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/co-je-vlastne-konstruovani>
- [5] SOUKUP, J. a M. SVOBODA. *Úvod do strojnictví a elektrotechniky*. První. Ústí. n. l.: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem. Fakulta výrobních technologií a managementu, 2013. ISBN 978-80-7414-608-4.
- [6] SKAŘUPA, J. *Kreativita a inovační myšlení v konstruování*. První. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1717-0.
- [7] SKAŘUPA, J. *Metodika konstruování*. Ostrava: VŠB Ostrava, 1992. ISBN 9788070781678.
- [8] KRENŽELOK, A. *Porovnání současných a moderních metod konstruování*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Michal Dosedla.
- [9] Konstrukce CNC obráběcích strojů: Konstrukční proces. In: *T-support* [online]. Praha: Toshulin [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/konstrukcni-proces-2>
- [10] SZLACHTA, T. *Základy konstruování I: Podklady k přednáškám*. Ostrava: VŠB Ostrava, Katedra částí a mechanismů strojů, 2007.
- [11] RAZVAN UDROIU. *Product Lifecycle Management - Terminology and Applications*. InTechOpen, 2018. ISBN 9781789845426.
- [12] Strukturální optimalizace. In: *Engineering* [online]. Žilina: CB Media [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/informacne-technologie/9231-strukturalni-optimalizace>
- [13] ŠNAJDR, Ondřej. *Topologická optimalizace příhradových konstrukcí*. Praha, 2005. Soutěžní práce. Vedoucí práce Matěj Lepš.

- [14] *Mit.edu: About atructural optimization* [online]. Massachusetts, 2017 [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEANLRefMap/simaanl-c-optover.htm#simaanl-c-optover-t-Terminology-sma-topic1>
- [15] GANDOMI, A. H., X. S. YANG, S. TALATAHARI a A. H. ALAVI. *Metaheuristic Applications in Structues and Infrastructures*. První. London: Elsevier, 2013. ISBN 978-0-12-398364-0.
- [16] DAPOGNY, Ch. a P. FREY. *An introduction to shapeoptimization, withapplications in fluidmechanics*. USA: Department of Mathematics, Rutgers University, 2014.
- [17] SHIMODA, M., S. MOTORA a H. AZEGAMI. A practical solution to the shape optimization problem of solid structures. *WIT Transactions on The Built Environment* [online]. WIT Press, 2009, (106) [cit. 2021-05-03]. ISSN 1743-3509. Dostupné z: doi:10.2495/OP090041
- [18] BAKHTIARY, N. *A New Approach for Sizing, Shape and Topology Optimization: 1996 SAE International Congress and Exposition*. Michigan, USA: The MacNeal-Schwendler Corporation, 1996.
- [19] GARZEN, N., P. M. CLAUSEN a C. B. W. PODERSEN. Sizing optimization for industrial applications and best practice design process. *World Congress onStructural and Multidisciplinary Optimisation* [online]. Sydney [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: doi:10.2495/HPSM160041
- [20] ABBAS, Syed M. *Bead Optimization to Maximize the Blast Resistance of a Plate Structure without Adding Mass using Tosca for Abaqus and Isight* [online]. In: . Dassault Systèmes [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/bead-optimization-maximize-blast-resistance-plate-structure-abbas/>
- [21] KIM, Hyun-guk, Can NERSE a Semyung WANG. Topography optimization of an enclosure panel for low-frequency noise and vibration reduction using the equivalent radiated power approach. *Materials & design* [online]. Elsevier Ltd, 2019, **183** [cit. 2021-05-05]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.108125
- [22] MAZOCH, J. *Topologická optimalizace v technické praxi*. Brno, 2019. Diplomová práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT. Vedoucí práce Petr Vyroubal.
- [23] ŽENČÁK, J. *Topologická optimalizace držáku řízení*. Brno, 2018. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně. Vedoucí práce Pavel Ramík.
- [24] SOUKUP, F. *Postup topologické optimalizace s využitím aditivních technologií*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze - Fakulta strojní. Vedoucí práce Libor Beránek.
- [25] PAGÁČ, M. Pozvánka na seminář: Topologická optimalizace jako nový směr konstrukce výrobků. In: *MŮJSOLIDWORKS.CZ* [online]. Brno: SolidVision [cit. 2021-04-08].



- Dostupné z: <https://www.mujsolidworks.cz/on-line-seminar-jak-na-topologickou-optimalizaci-v-solidworksu-2018/>
- [26] MAREŠ, Tomáš. *Základy konstrukční optimalizace: Svazek II.* [online]. Praha: Tomáš Mareš, 2006 [cit. 2021-03-25]. ISBN 80-239-6508-5. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/tomas.mares/z/z/ZakladyKonstrukcniOptimalizace/zko.pdf>
- [27] ROZVANY, G.I.N. Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2001, 21(2) [cit. 2021-04-08]. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s001580050174
- [28] ŠEDIVÝ, J. *Topologická optimalizace a bionické konstrukce v aditivní výrobě*. Ostrava, 2017. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní. Vedoucí práce Merek Pagáč.
- [29] HSU, Ming-hsiu a Yeh-liang HSU. Generalization of two- and three-dimensional structural topology optimization. *Engineering optimization* [online]. Taylor & Francis, 2005, 37(1) [cit. 2021-04-08]. ISSN 0305-215X. Dostupné z: doi:10.1080/03052150412331271208
- [30] SIGMUND, O. *Design of Material Structures Using Topology Optimization*. Lyngby, Denmark, 1994. Disertační práce. Technical University of Denmark. Vedoucí práce Pauli Pedersen.
- [31] WATSON, M. D., B. L. MESMER a P. A. FARRINGTON. *Engineering Elegant Systems: Postulates, Principles, and Hypotheses of Systems Engineering: Theory of Systems Engineering* [online]. Springer, Cham, 2019 [cit. 2021-03-16]. ISBN 978-3-030-00114-8.
- [32] MARTINS, J. R. R. A. *Multidisciplinary Design Optimization Laboratory* [online]. Michigan: University of Michigan, 2011 [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <http://cba.mit.edu/events/11.08.FAB7/Martins.pdf>. 2011. University of Michigan.
- [33] *Siemens PLM Software rozšiřuje technologii generativního designu v softwaru NX* [online]. CIMdata, 2021 [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: [www.CIMdata.com](http://www.CIMdata.com)
- [34] TAO, W. a M. C. LEU. Design of lattice structure for additive manufacturing. *International Symposium on Flexible Automation*. Cleveland, Ohio: Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Missouri University of Science and Technology, 2016. Dostupné z: doi:10.1109/ISFA.2016.7790182
- [35] A bracket's lattice structure that was built using additive manufacturing. In: *Wilde: Additive Manufactured Parts with CT Scanning & Mechanical Simulation | ANSYS Blog* [online]. ANSYS [cit. 2021-03-17].
- [36] BEAVER, E. B. *SOLID THINGS: SolidThings Inspire* [online]. USA: Altair Engineering, 2016 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z:

[https://solidthinking.com/inspire2016/pdf/solidthinking\\_inspire\\_2016\\_datasheet.pdf](https://solidthinking.com/inspire2016/pdf/solidthinking_inspire_2016_datasheet.pdf)

- [37] *Altair: Altair Inspire* [online]. USA: Altair Engineering, 2021 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.altair.com/inspire/>
- [38] *Techsoft Engineering: Ansys Mechanical Enterprise* [online]. TechSoft Engineering [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.techsoft-eng.cz/software/ansys-mechanical-enterprise>
- [39] *Develop3D: Ansys Mechanical* [online]. 2017 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://develop3d.com/reviews/review-ansys-mechanical-r18-mechanical-simulation-fea-engineering/>
- [40] *Simulia.cz: Tosca* [online]. Adiada.cz, 2021 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.simulia.cz/software/tosca>
- [41] MSC.Nastran™ Topology Optimization: Optimizing Design Topology Using Your Finite Element Models. *Mscsoftware* [online]. Californie, USA: MSC.Software Corporation, 2005 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: [https://www.mscsoftware.com/assets/3154\\_NA2004NOVZTOPZLTDAT.pdf](https://www.mscsoftware.com/assets/3154_NA2004NOVZTOPZLTDAT.pdf)
- [42] *Filecr: MSC Apex Generative Design 2020* [online]. [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://filecr.com/windows/msc-apex-generative-design/>
- [43] KLIPPSTEIN, H., A. DUCHTING, T. REIHER, F. HENGSBACH, D. MENGE a H. SCHMID. *DEVELOPMENT, PRODUCTION AND POST-PROCESSING OF A TOPOLOGY OPTIMIZED AIRCRAFT BRACKET* [online]. Pederborn, Germany: Pederborn University [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/338429863>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$b_l$	[*]	Spodní mez proměnných vedlejších podmínek
$b_u$	[*]	Horní mez proměnných vedlejších podmínek
$E_0$	[MPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
$h_{max}$	[mm]	Maximální výška prolisu
$P_s$	[–]	Systémové prostředí
$R_e$	[MPa]	Mez kluzu
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti
$x_A$	[*]	Vektor analytických proměnných
$x_b$	[*]	Vektor proměnných vedlejších podmínek
$X_i$	[*]	Lokální návrhové proměnné
$x_m$	[MPa]	Materiálové proměnné
$x_N$	[mm]	Vektor návrhových proměnných
$x_r$	[mm]	Rozměrové proměnné
$x_t$	[–]	Tvarové proměnné
$Y_{ij}$	[*]	Vazebné výstupní proměnné MDO
$\nu$	[–]	Poissonova konstanta
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota materiálu
$\rho_e$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Relativní hustota materiálu
$\rho_m$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Minimální relativní hustota materiálu
$\mathbb{E}_p$	[*]	Vektor proměnných úlohy

*Poznámka:* Označení jednotek [\*] znamená, že vždy záleží na zvolené fyzikální veličině pro daný parametr.

AAO – All-At-Once Method

ASE – Anizotropní pevný nebo prázdný element

BLISS – Bilevel Integrated System Synthesis

CAD – Computer Aided Design

CAE – Computer Aided Engineering

CAM – Computer Aided Manufacturing

CO – Collaborative Optimization

CSSO – Concurrent Subspace Optimization

FDM – Fused Deposition Moulding

IDF – Individual-Discipline Feasible

ISE – Isotropní pevný nebo prázdný element

ISEP – Izotropní pevný, prázdný nebo porézní element

LO – Layout Optimization

MDF – Multiple-Discipline Feasible

MDO – Multidisciplinární optimalizace

MKO – Metoda konečných objemů

MKP – Metoda konečných prvků

NOM – Non Optimal Microstruture

OMP – Optimal Microstructure with Penalization

RP – Rapid Prototyping

SIMP – Solid Isotropic Microstructure with Penalization

SLA – Stereolithography

SLM – Selective Laser Melting

SLS – Selective Laser Sintering

TO – Topologická optimalizace

TS – Technický systém